

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Změna jakosti materiálu při výrobě šroubových pružin pro kolejová vozidla

Changing the Quality of the Material in the Production of Springs for Transport Vehicles

Student:

Bc. David Krychtálek

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Krychtálek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: Změna jakosti materiálu při výrobě šroubových pružin pro kolejová vozidla
Changing the Quality of the Material in the Production of Springs for Transport Vehicles

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Návrh vhodných materiálů pro výrobu šroubových pružin pro kolejová vozidla.
2. Popis mechanických vlastností a mikrostruktury základních materiálů.
3. Výroba pružin z navržených materiálů.
4. Kontrola mechanických vlastností a mikrostruktury zhotovených pružin.
5. Zhodnocení vhodnosti volby vybraných materiálů pro výrobu pružin.

Seznam doporučené odborné literatury:

PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu I.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001, 505 s. ISBN 80-7204-193-2.
PTÁČEK, L. A KOL. *Nauka o materiálu II.*. Praha: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2001, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
JECH, J. *Tepelné zpracování oceli*. Praha: SNTL Praha, 1969, 342 s.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**

Konzultant diplomové práce: **Ing. Petr Zapletal**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2018



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem si vědom, že na tuto moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše)
- беру на вѣдомі, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21. 5. 2018



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. David Krychtálek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vinohrádky 555, Plumlov 798 03

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Krychtálek, D. *Změna jakosti materiálu při výrobě šroubových pružin pro kolejová vozidla: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2018, 69 s. Vedoucí práce: Krejčí, L.

Diplomová práce řeší problematiku tepelného zpracování křemíkových pružinových ocelí. Úvodní část práce představuje vhodné materiály pro výrobu šroubových pružin. V další fázi jsou popsány základní parametry výrobního procesu, mechanické vlastnosti, chemické složení a využití šroubových pružin v praxi.

V experimentální části jsou uvedeny doporučené podmínky pro tepelné zpracování křemíkových pružinových ocelí a následná výroba zkušebních vzorků šroubových pružin. Pro experiment byly vybrány jakosti 51CrV4, 52CrMoV4, 54SiCr6 a 52SiCrNi5. V závěru práce je provedeno vyhodnocení výsledků mechanických zkoušek a metalografického šetření.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Krychtálek, D. *Changing the Quality of the Material in the Production of Springs for Transport Vehicles: Master Thesis*. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2018, 69 p. Thesis supervisor: Krejčí, L.

This thesis is aimed at the issue of heat treatment of silicon spring steels. The thesis is divided into several parts - the introduction presents proper materials for helical springs, in another section are described basic parameters of production processes, mechanical properties, chemical structures and how are these springs used.

In the experimental section are described recommended heat treatment conditions of silicon spring steels and production of specimens for testing made from 51CrV4, 52CrMoV4, 54SiCr6, 52SiCrNi5. The conclusion evaluates the results of mechanical and metallographical testing and examination.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	9
1 Návrh vhodných materiálů pro výrobu šroubových pružin pro kolejová vozidla	10
1.1 Vhodné materiály pro šroubové pružiny	10
1.2 Výroba kruhové oceli (tyčové).....	11
1.3 Technicko dodací podmínky pro kruhovou pružinovou ocel.....	11
1.3.1 Všeobecná ustanovení	11
1.3.2 Chemické složení	11
1.4 Popis šroubových pružin a jejich základních vlastností.....	12
1.4.1 Popis šroubové pružiny	12
1.4.2 Základní parametry šroubové pružiny.....	13
1.5 Výrobní proces šroubových pružin	16
1.5.1 Výroba šroubových pružin	16
1.5.2 Povrchová úprava šroubových pružin	17
1.6 Využití šroubových pružin v praxi.....	18
1.6.1 Použití	18
1.6.2 Železniční průmysl.....	18
2 Popis mechanických vlastností a mikrostruktury základních materiálů	19
2.1 51CrV4 (1.8159)	19
2.1.1 Chemické složení	19
2.1.2 Mechanické vlastnosti	19
2.2 52CrMoV4 (1.7701).....	20
2.2.1 Chemické složení	20
2.2.2 Mechanické vlastnosti.....	20
2.3 52SiCrNi5 (1.7117).....	21
2.3.1 Chemické složení	21
2.3.2 Mechanické vlastnosti	21
2.4 54SiCr6 (1.7102).....	22
2.4.1 Chemické složení	22
2.4.2 Mechanické vlastnosti	22
2.5 Vliv legujících prvků na tepelné zpracování oceli	23
2.5.1 Křemík	23
2.5.2 Nikl.....	23
2.5.3 Chrom.....	23

2.5.4	Mangan.....	24
2.5.5	Molybden	24
2.5.6	Vanad	24
2.6	Rozbor lomů u šroubových pružin.....	25
2.6.1	Příčiny vzniku lomů	25
2.6.2	Zkoušky vyhodnocování lomu	26
2.6.3	Praktické příklady lomů	26
3	Experimentální část práce	28
3.1	Volba materiálů.....	28
3.1.1	Kontrola chemického složení.....	28
3.1.2	Mechanické vlastnosti.....	29
3.1.3	Metalografické šetření.....	30
3.2	Zmapování doporučených podmínek pro tepelné zpracování křemíkových ocelí	31
3.3	Výroba pružin	32
3.3.1	Materiál jakosti 54SiCr6	33
4	Kontrola mechanických vlastností a metalografické šetření zhotovených pružin	38
4.1	Zkoušky mechanických vlastností	38
4.1.1	Vyhodnocení mechanických vlastností.....	39
4.1.2	Vyhodnocení tvrdosti	41
4.2	Metalografické šetření.....	43
4.2.1	Vyhodnocení kontroly povrchu a mikrostruktury pod povrchem	43
4.2.2	Vyhodnocení velikosti zrna.....	45
5	Zhodnocení vhodnosti volby vybraných materiálů pro výrobu pružin	48
	Závěr	50
	Seznam použité literatury	53
	Seznam příloh.....	55

Seznam použitých značek a symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A	Tažnost	[%]
CNC	Computer number control – počítačem číslicově řízený stroj	
D	Střední průměr celé pružiny	[mm]
d	Průměr tyče, nebo drátu	[mm]
F	Stlačovací síla	[N]
f_1	Vlastní frekvence	[s ⁻¹]
KU ₂	Nárazová práce	[J]
L ₀	Volná výška v nezatíženém stavu šroubové pružiny	[mm]
L _j	Délka po uplynutí předepsaných hodin	[mm]
m	Hmotnost	[kg]
n	Počet činných závitů pružiny	[-]
N	Počet cyklů	[-]
P _{max}	Maximální stlačení pružiny	[N]
R	Tuhost pružiny	[N·mm ⁻¹]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
s	Plocha	[mm ²]
t	Čas	[min]
W	Práce pružiny	[J]
Z	Zúžení	[%]
α	Feritická struktura	
$\Delta\delta$	Napětí	[MPa]
γ	Austenitická struktura	
Δl	Délka, o kterou se pružina prodlouží	[mm]
τ	Smykové napětí	[MPa]

Úvod

Šroubové, listové, talířové a mnoho dalších pružin, řadíme i z historického hlediska mezi základní strojírenské výrobky. S pružinami se dostáváme dennodenně do styku, aniž bychom si to uvědomovali. Při řízení auta do práce, u kterého se vyskytují šroubové pružiny, při cestě tramvají nebo vlakem (listové i šroubové pružiny) nebo při používání strojních zařízení. Pružiny mohou dosahovat různých rozměrů, od malých pružinek v hodinkách, až po obrovské pružiny, které slouží k tlumení vibrací základů výškových budov.

Tato práce se zabývá šroubovými pružinami, respektive jejich výrobou pomocí tepelného zpracování pružinové oceli. Základním polotovarem jsou válcované tyče o různých průměrech. Charakteristické vlastnosti pružinové oceli mají velký vliv na konečné vlastnosti výsledného produktu. Mezi takovéto základní pružinové oceli patří legované oceli chemickými prvky chromem, vanadem, molybdenem, křemíkem, niklem. Takovéto oceli mají označení např.: 51CrV4 a 52CrMoV4.

Rozvojem technologií ve strojírenství i v jiných oblastech se zvyšují také nároky na vlastnosti a životnost strojírenských součástí, šroubové pružiny nevyjímaje. Trendem ve vývoji je taktéž zavádění do výroby nových jakostí materiálů, vedoucích k rozšíření nabízeného sortimentu a maximálnímu využití především mechanických vlastností. Cílem diplomové práce je změna jakosti materiálu pro výrobu šroubových pružin pro kolejová vozidla. Návrh a odzkoušení nově navržených materiálů a doporučení nebo zamítnutí zavedení těchto materiálů do výrobního procesu. Zadavatelem diplomové práce byl stanoven požadavek na odzkoušení dvou jakostí materiálů, konkrétně jakostí 54SiCr6 a 52SiCrNi5. Tyto dvě jakosti byly vybrány z důvodu podobných, či lepších mechanických vlastností, oproti standardním základním materiálům, z kterých zadavatel provádí výrobu šroubových pružin. U tepelného zpracování křemíkových ocelí vzniká obecný názor nebo domněnka, že by vlivem křemíku mohlo docházet k oduhličování povrchu materiálu. Pokud by se tento obecný názor potvrdil, je potřeba tyto materiály ohřívat v pecích s plynou atmosférou. Jenže u zadavatele se takové pece nenachází, proto je tedy požadavek provést šetrnění, zda i v pecích bez plyné atmosféry, lze křemíkové materiály tepelně zpracovávat bez toho, aniž by docházelo k nepřijatelnému oduhličování. Pokud by se experiment podařil, a prokázaly by se lepší mechanické vlastnosti a prokázalo se přípustné oduhličování, mohl by zadavatel nabízet další materiálový sortiment, ze kterého je možné šroubové pružiny vyrábět. Tohle by mohlo přivést nové zákazníky, nebo stávající přimět k navýšení poptávek na nové pružiny.

1 Návrh vhodných materiálů pro výrobu šroubových pružin pro kolejová vozidla

Kapitola se věnuje představení vhodných materiálů pro výrobu šroubových pružin, výrobě kruhové oceli pro šroubové pružiny, technicko dodacím podmínkám pro kruhovou pružinovou ocel, popisem šroubových pružin a jejich základních vlastností a použitím šroubových pružin v praxi.

1.1 Vhodné materiály pro šroubové pružiny

Při volbě materiálů pro výrobu šroubových pružin je nutné zohlednit nejen procesy výroby, kterými bude materiál teplotně a mechanicky namáhán, ale rovněž zatížení, kterému bude vyrobená pružina vystavena. Na vlastnosti materiálů jsou kladeny vysoké požadavky pro modul pružnosti, vysokou mez kluzu v tahu, mez pevnosti v tahu, tvrdost, vysokou mez únavy, houževnatost materiálu, dobrou odolnost proti creepu a relaxaci napětí. Vyžaduje se malý sklon k oduhličování povrchu materiálu, eliminace povrchových vad, vysoká mikročistota, odolnost proti korozi a v neposlední řadě mezní úchylnky rozměrů a tolerance tvaru. [1] [6]

Vysoká mez kluzu a únavy se u pružinových ocelí stanovuje s ohledem na namáhání pružiny střídavým zatížením a to tahem, tlakem a krutem (u šroubových pružin). Vysoká houževnatost je u pružinových ocelí vyžadována z důvodu dynamického zatížení pružin a také kvůli plastické deformaci při výrobě. Stanovené mechanické vlastnosti lze docílit vhodnými parametry tepelného zpracování nebo tvářením za studena. Oceli dělíme na nelegované ušlechtilé oceli nebo legované pružinové oceli. [1] [6]

Nelegované ušlechtilé oceli jsou vhodné zejména pro méně namáhané pružiny a pro použití za normální teploty kvůli nízké prokalitelnosti a nízkým mechanickým vlastnostem. Používají se oceli třídy 12, které mají snížené množství vměstků vhodnou technologií tavení. Výroba těchto drátů probíhá pomocí tzv. patentování a tažení za studena. Obsah uhlíku je ovlivněn podle namáhání. [1] [6]

Legované pružinové oceli používáme pro vysoce namáhané pružiny, nebo také pro pružiny vyšších průměrů. Mezi legující prvky patří mangan, křemík, chrom, vanad, molybden. Promísením legujících prvků můžeme vytvořit oceli např.: manganové, křemíkové, mangan-křemíkové, chrom-křemíkové, mangan-chromové nebo

chrom-vanadové. Jednotlivé chemické prvky ovlivňují vlastnosti ocelí charakteristickou vlastností. Mangan v oceli zvyšuje prokalitelnost a mez kluzu. Podobně jako křemík, který také zvyšuje mez kluzu, ale rovněž zvyšuje odolnost proti popuštění. Jeho záporná vlastnost je, že díky křemíku dochází při tepelném zpracování k oduhličování povrchu materiálu. Obsah manganu se u pružinových ocelí uvádí v rozmezí 0,9 až 1,2 % a obsah křemíku v oceli se pohybuje mezi 1,5 až 1,9 %. Legující prvek chrom v oceli zvyšuje prokalitelnost a odolnost proti popuštění. Nejčastěji se kombinuje s manganem a křemíkem. Jako příklad jsou uvedeny jakosti 54SiCr6 a 16MnCr5. Pokud se v ocelích vyskytuje chemický prvek vanad, označujeme ocel např. 51CrV4. [1]

1.2 Výroba kruhové oceli (tyčové)

Tyče lze vyrábět několika technologiemi. První možností je válcování předeřátého materiálu, který byl vyroben kontinuálním odléváním a postupně procházel jednotlivými segmenty na válcovací trati. Vývalek se poté dělí a chladne. Lze válcovat i ingoty, ale ty se musí nejdříve vyválcovat na válcovací stoličce do vsázkového polotovaru, a až poté válcovat. Válcováním lze vyrábět tyče jen do omezených průměrů (cca do 350 mm), větší průměry se kovou. Pro tuhle metodu se používají výhradně ingoty, nebo předkované polotovary. Polotovary se kovou na lisech, kovacíh strojích, nebo na bucharech. [2]

Tyčová ocel se může ještě vyrábět pomocí tažení. Průměry tyčí se dají upravovat pomocí tzv. loupání.

1.3 Technicko dodací podmínky pro kruhovou pružinovou ocel

1.3.1 Všeobecná ustanovení

Technické podmínky platí pro výrobu, prověřování a dodávání za tepla válcované kruhové pružinové oceli pro výrobu šroubových pružin za tepla. Zahrnují požadavky evropské normy ČSN EN 10089, EN 10278 a zákaznických specifikací.

1.3.2 Chemické složení

Výrobce pružinové oceli dodává materiál s chemickým složením odpovídajícím normě ČSN EN 10089, které má vliv na jeho prokalitelnost. Tato norma specifikuje i další vlastnosti a na základě objednávky od zákazníka může Inspekční certifikát oceli uvádět další údaje, např. množství vodíku.

1.4 Popis šroubových pružin a jejich základních vlastností

1.4.1 Popis šroubové pružiny

Pružinu lze obecně definovat jako pružné těleso (Obr. 1, 2), které je schopno vytvářet pružnou deformaci pod zatížením a následně se navrátit do původního stavu. Jedná se o tyč tepelně zpracovanou, která je navinuta na trn při určitém průměru a stoupání. Tyto pružiny se vyznačují vysokým využitím materiálu, a tedy relativně nízkou vahou. Šroubové pružiny mají v provozu pružící funkci. Pružiny nejčastěji slouží pro absorpci energie a zmírnění nárazu. Funkce jako je vedení kola a tlumení přebírají v tomto případě jiné komponenty. Šroubové pružiny jsou obvykle s pravotočivým vinutím, jenom u pružinových sad často používaných na železničních podvozcích se skládají z pravotočivých a levotočivých vinutých pružin, aby bylo zamezeno dotyku jednotlivých závitů sousedních pružin a také, aby se otáčivé momenty obou pružin při pružení mohly částečně kompenzovat. [3]



Obr. 1 Šroubová pružina po navinutí [4]



Obr. 2 Hotová šroubová pružina [4]

Samotná pružina je definována pěti hlavními parametry, kterými jsou průměr materiálu „ d “, počet činných závitů „ n “, střední průměr pružiny „ D “, volná výška v nezátíženém stavu „ L_0 “ a tvar závěrného závitu. Pružinu můžeme dále rozdělovat na dvě části. První část nazýváme tzv. „pružící část“ a druhou částí je nepružící část. Nepružící část slouží k přenosu vnějšího zatížení do aktivní části pružiny, ve které dochází k pružným deformacím. [3]

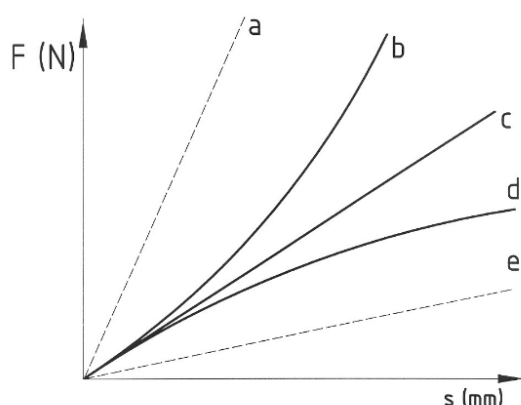
1.4.2 Základní parametry šroubové pružiny

Práce pružiny – jedná se o práci, která musí být vykonána, aby bylo dosaženo určitého přetvoření pružiny, případně práce, kterou odevzdá pružina při odlehčení. Velikost práce pružiny znázorňuje plocha „s“, která je ohraničena charakteristikou pružiny a vodorovnou osou. [5]

Lze ji spočítat dle vzorce:

$$W = \int_0^s F(s) \cdot ds = \iint_0^s R(s) \cdot d^2s \quad [J] \quad (1)$$

Charakteristika / tuhost pružiny – je závislost mezi zatížením a deformací. Rozlišujeme tři základní průběhy charakteristik, mezi které patří progresivní, lineární a degresivní charakteristika pružiny (Obr. 3). považujeme ji jako jeden ze základních parametrů šroubových pružin. [6]



- a – charakteristika tvrdé pružiny
- b – charakteristika progresivní pružiny
- c – charakteristika lineární pružiny
- d – charakteristika degresivní pružiny
- e – charakteristika měkké pružiny

Obr. 3 Charakteristika pružin [5]

Tuhost charakterizuje možné chování pružiny. Existují dva druhy tuhostí, a to boční tuhost, která se skládá z horizontální síly a části vertikální síly, nebo příčná tuhost, kde se počítá s vertikální silou. V průběhu zatěžování pružin se tyto tuhosti výrazně mění. Pro zkoušení tuhostí využíváme působení dvou sil. Tuhost pružiny ovlivňuje, o kolik se dokáže pružina vlivem zatížení stlačit o délku Δl . Samotná tuhost se označuje písmenem „R“ a je udávána v jednotkách N/mm. [6]

Předsedání – při překročení dovoleného napětí (meze kluzu) dochází k plastickému přetvoření. Po odstranění zatěžující síly dojde k odlehčení pružiny a dojde k sesednutí ve směru působící síly. V průřezu pružiny vzniká vnitřní napětí, které v maximálně namáhaných okrajových vláknech působí proti provoznímu napětí, čímž se zabraňuje vzniku napěťových špiček. [5]

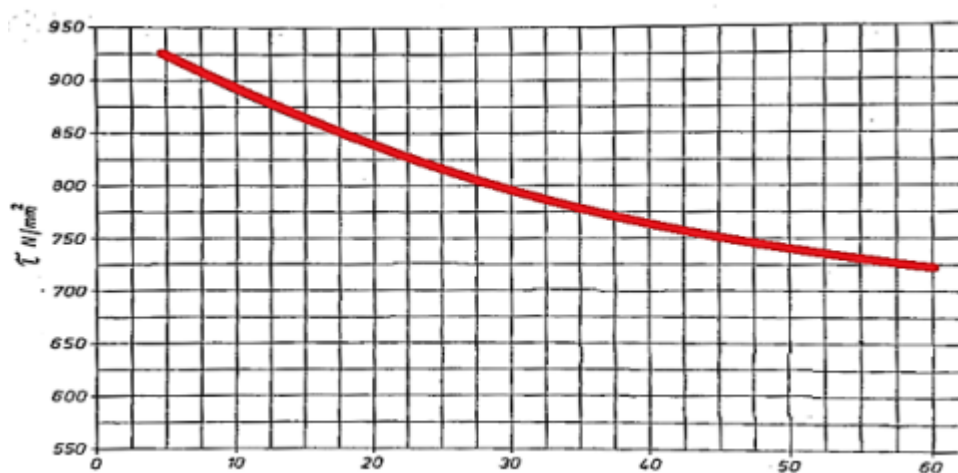
Vlastní frekvence – pružiny mohou kmitat ve dvou směrech, a to v podélném nebo příčném směru. Jakákoliv vlastní frekvence, může vést k vysokým rázům v pružině a to může ohrozit její funkci. [5]

Výpočet vlastní frekvence:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{R}{m}} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (2)$$

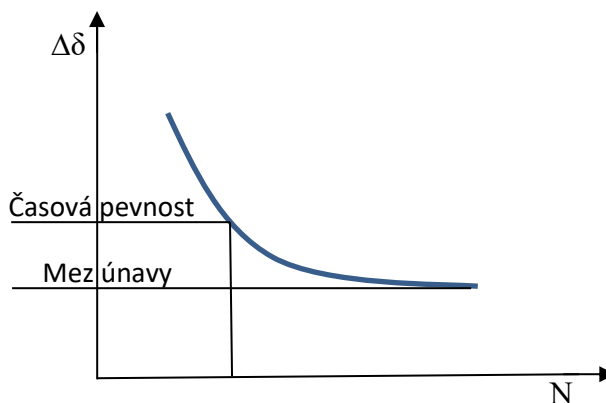
Dovolené smykové napětí – jedná se o napětí, na které by měla být staticky nebo kvazistaticky zatížena pružina navrhována. Toto platí pouze v případě, že předpokládáme vliv normálových sil, který je zanedbatelný. Aby docházelo k co nejlepšímu využití materiálu, měla by se hodnota maximálního napětí v pružině blížit dovolenému napětí. [6]

Hodnoty dovoleného smykového napětí v závislosti na průměru materiálu uvádí graf 1, který je převzat z normy EN 13906-1.



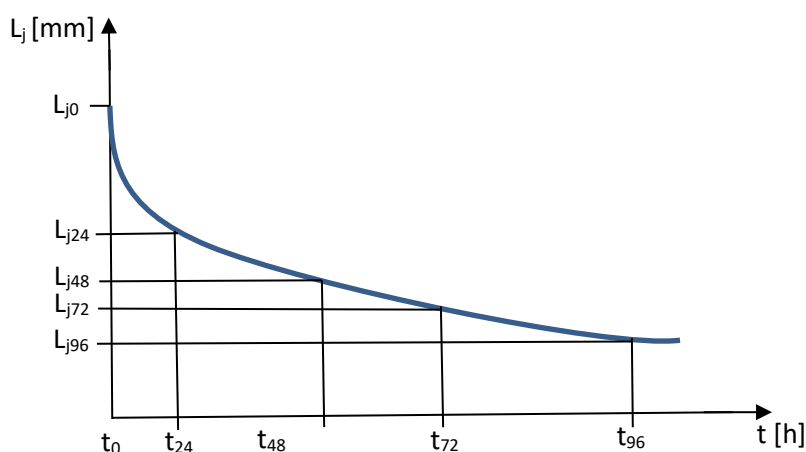
Graf 1 Smykové napětí v závislosti na průměru materiálu [5]

Mez únavy – jedná se o amplitudu napětí, kdy nedochází k únavovému lomu, tzn. počet cyklů, musí být větší než $2 \cdot 10^6$. Na tuto mez by měly být navrhovány všechny pružiny zatěžované dynamicky. Pro znázornění únavové životnosti se používá Wöhlerova křivka (Obr.4). [6]



Obr. 4 Wöhlerova křivka

Creep (relaxace) – pokud je pružina dlouhodobě zatěžována v blízkosti meze kluzu, tak dochází ke snižování výšky pod zatížením. Při konstantním zatížení po 48 hodinách, je dosaženo cca 65 % relaxace a po 10^3 až 10^5 hodinách se zastaví jako mezní hodnota. Dle normy EN 13298:2003 nesmí plastická deformace pružiny překročit 1 % výšky po 96 hodinách. Creep lze snížit předsedáním pružin za tepla. [6]



Graf. 2 Creepová křivka

t - čas [h]

L_j - Délka po uplynutí předepsaných hodin [mm]

1.5 Výrobní proces šroubových pružin

V níže uvedených kapitolách 1.5.1 a 1.5.2 je popsána výroba pružin a jejich povrchová úprava.

1.5.1 Výroba šroubových pružin

Celý proces výroby začíná při nákupu materiálu u výrobce. Dodaný materiál je uskladněn a následně vydáván na dílnu na základě výdejky materiálu pro daný produkt šroubové pružiny. Materiál se nadělí na požadované délky pro navinutí pružin. Připravené polotovary jsou tepelně zpracovány v ohřívací peci. Tyče se ohřejí v peci na požadovanou tvářecí teplotu pro navíjení pružin.

Navíjení pružin probíhá na výrobní lince CNC pomocí CNC programu na trn průměru odpovídajícímu vnitřnímu průměru výsledné šroubové pružiny. Manipulátorem je z trnu navinutá pružina přeložena do dohřívací pece k zahřátí na požadovanou teplotu před kalením. Po ohřátí pružiny v peci je pružina přesunuta robotem do kalicího automatu a je spuštěna výtahem do oleje. Pružina v oleji o předepsané teplotě stráví potřebnou dobu k zakalení na požadované vlastnosti. Následně jsou pružiny vloženy do popouštění pece. Pružiny popouštíme na teploty pod teplotou A_1 , kdy následně dochází k výdrži na teplotě po určitý čas a poté následuje ochlazení. Hlavním účelem popouštění je snížení vnitřního pnutí, které vzniklo v pružině po předchozím kalení, následkem toho je snížení tvrdosti a zvýšení houževnatosti. [20]

Další krok ve výrobě pružiny je odměčknutí pružiny na nejvyšší hodnotu možného zatížení, tzv. P_{\max} v automatickém lise. Cílem odměčknutí je, mírně překročit mez kluzu materiálu, čím se do materiálu vnese napětí a dojde k trvalé deformaci. Tohle napětí můžeme nazývat záporné oproti provoznímu napětí, které lze nazývat jako kladné napětí. Záporné napětí nám slouží k pozdějšímu zatížení a působí proti provoznímu. Při zatížení nejdříve spotřebuje pružina záporné napětí a až poté zatěžujeme samotný materiál. Tím pádem se nám zvýší životnost a provozní stálost. Broušení pružin probíhá v automatických bruskách tzv. karuselech. U pružin dochází k broušení jejich čel, z důvodu přesného ustavení do konstrukce (např.: podvozek vlaku, podvozek tramvají atd.). Sledované parametry jsou (rovnoběžnost čel, odchylka osy pružiny od kolmé osy, tloušťka konců). [20]

Na konec samotného procesu se provádí zkoušky. Hledají se případné povrchové trhlinky v materiálu metodou magnetoskopie. Metoda funguje na principu magnetu, kdy na povrch nanese feromagnetický prášek, následně materiál zmagnetizujeme a zjišťujeme, zda se na povrchu vyskytují trhlinky. Poté dochází k otryskání pružin v tryskačích pro odstranění nežádoucích okují a vnesení požadovaného napětí do povrchu pružiny.

Další operací je kontrola výsledných parametrů pružiny, kterými jsou tuhost, výška při síle, volná výška v nezátíženém stavu, kontaktní linie, rozměrové parametry.

Destruktivní zkoušky se provádí s požadavkem na hlavní parametry, jako jsou mez kluzu v tahu, mez pevnosti v tahu, tažnost, zúžení, nárazová práce a výsledná tvrdost. Pomocí metalografického šetření se vyhodnocuje výsledná struktura materiálu po tepelném zpracování, velikost zrna, oduhličení povrchu materiálu, mikročistota. Jedná se o ověření kvality nebo také správnosti tepelného zpracování. Na konec výrobního procesu se provádí povrchová úprava pružin, která probíhá pomocí lakování. [20]

1.5.2 Povrchová úprava šroubových pružin

Pro povrchovou úpravu se používají tři lakovací systémy pro lakování pružin. Prvním systémem je tzv. máčení pružin, kdy se pružiny namáčí do lázní s připravenou barvou. Druhým způsobem povrchové úpravy je nanášení barvy na pružiny stříkáním. Na pružiny se stříká barva ve dvou krocích. V prvním kroku dojde k nastříkání základové barvy, v dalším kroku dochází k nastříkání finální barvy. Barvy mohou být epoxidové, polyuretanové, vodou ředitelné. Barva se na pružiny nanáší pomocí stříkacích pistolí. Třetí způsob, jak nanášet barvu na pružiny je pomocí automatu. Technologický proces funguje tak, že pomocí vysokofrekvenčních zvonků a elektrostatického nanášení nátěrového systému se barva přichytí na pružině. Díky této technologii je možné nanášet barvu ve velmi nízkém rozptylu tloušťky.

Po nanesení povrchové úpravy dochází ke kontrolám a testům. Provádíme vizuální kontrolu, zda nejsou na povrchu nějaké tečky, kapky, důlky, škrábance, vrypy po háčcích, zda se nevyskytují nenastříkaná místa na pružině, kontrolu odstínu barvy atd. Dále je kontrolována tloušťka nanesené barvy na pružině, lesk barvy (nátěru). Požadavek je i na vysokou korozní odolnost, kterou můžeme kontrolovat pomocí zkoušky v solné komoře, mřížkové zkoušky, odtrhové zkoušky atd.

1.6 Využití šroubových pružin v praxi

V kapitolách níže je popsáno, kde je možné využití šroubových pružin a jsou uvedeny praktické příklady.

1.6.1 Použití

Šroubové pružiny se v praxi nejčastěji používají v železničním průmyslu. Nalézají své uplatnění i v jiných oblastech, například v zemědělství, energetice (použití pro tlumení potrubí, turbín a ventilů s pracovními podmínkami ve vlhkém prostředí), stavebním a důlním průmyslu (pružiny se používají jako součástky pro pásové dopravníky, bagry, rypadla, kde je častým požadavkem předpětí pružin v tlumící jednotce). Speciálním odvětvím je použití šroubových pružin pro tzv. antivibration (využití pro tlumení vibrací budov, mostů a zařízení v seismických oblastech s vysokou tektonikou). [8]

1.6.2 Železniční průmysl

V železničním průmyslu se šroubové pružiny využívají jako součástky do podvozků pro vlaky, vysokorychlostní vlaky, metro, tramvaje, dále se pružiny nachází v nákladních vozech či lokomotivách (Obr. 5 – 8)



Obr. 5 Podvozek vysokorychlostního vlaku [9]



Obr. 6 Podvozek tramvaje [20]



Obr. 7 Podvozek metra [10]



Obr. 8 Podvozek tramvaje

2 Popis mechanických vlastností a mikrostruktury základních materiálů

V níže uvedených kapitolách jsou popsány normované vlastnosti ocelí jakosti 51CrV4 a 52CrMoV4 pro výrobu šroubových pružin a vlastnosti nově navržených zkoušených ocelí jakosti 52SiCrNi5 a 54SiCr6. V závěru kapitoly je proveden rozbor vlivu legujících prvků na tepelné zpracování ocelí a vzniku lomů u šroubových pružin.

2.1 51CrV4 (1.8159)

Jakost 51CrV4 je nízkolegovaná ušlechtilá chrom – vanadová ocel pro zušlechťování pružin. Technicko dodací podmínky se řídí dle normy ČSN EN 10089. Označení jakosti podle ČSN 41 5260. Mezi hlavní využití této jakosti oceli patří namáhané pružiny a pružné elementy pro automobily a kolejová vozidla, dále pro talířové a kroužkové pružiny. Oproti Cr – Si pružinovým ocelím dosahuje vyšších hodnot prokalitelnosti a je méně náchylná k oduhličení. [11]

2.1.1 Chemické složení

Chemické složení dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 1.

Tab. 1 Chemické složení oceli 51CrV4 [12]

Označení oceli	Hmotnostní podíl v %						
	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Cu + Sn
51CrV4	0,47	0,40	0,70	0,025	0,025	0,90	Cu + 10Sn ≤ 0,60
	–		–			–	
	0,55		1,10			1,20	

2.1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 2.

Tab. 2 Mechanické vlastnosti oceli 51CrV4 [12]

Označení oceli	Teplota kalení [°C]	Prostředí ochlazení	Teplota popouštění [°C]	R _{p0,2} [MPa] min.	R _m [MPa]	A [%] min.	Z [%] min.	Nárazová práce při 20°C KU [J] min.
51CrV4	850	Olej	450	1200	1350 – 1650	6	30	8

2.2 52CrMoV4 (1.7701)

Jakost 52CrMoV4 je nízkolegovaná ušlechtilá chrom – molybden – vanadová ocel pro zušlechťované pružiny. Technické dodací podmínky se řídí dle normy ČSN EN 10089. Tato jakost se využívá pro namáhané pružiny a pružné elementy do automobilů a kolejových vozidel, dále pro talířové a kroužkové pružiny. Oproti Cr – Si pružinovým ocelím dosahuje především vyšší prokalitelnosti. [13]

2.2.1 Chemické složení

Chemické složení dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 3.

Tab. 3 Chemické složení oceli 52CrMoV4 [12]

Označení oceli	Hmotnostní podíl v %						
	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Cu + Sn
52CrMoV4	0,48	0,40	0,70	0,025	0,025	0,90	Cu + 10Sn ≤ 0,60
	–		–			–	
	0,56		1,10			1,20	

2.2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 4.

Tab. 4 Mechanické vlastnosti oceli 52CrMoV4 [12]

Označení oceli	Teplota kalení [°C]	Prostředí ochlazení	Teplota popouštění [°C]	R _{p0,2} [MPa] min.	R _m [MPa]	A [%] min.	Z [%] min.	Nárazová práce při 20°C KU [J] min.
51CrV4	860	Olej	450	1300	1350 – 1650	6	35	10

2.3 52SiCrNi5 (1.7117)

Jakost 52SiCrNi5 je pružinová ocel a používá se pro výrobu pružin, které jsou vystaveny zvýšenému namáhání. Jedná se o křemík – chrom – niklovou ocel pro zušlechťování pružin. Technicko dodací podmínky se řídí dle normy ČSN EN 10089.[14]

2.3.1 Chemické složení

Chemické složení dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 5.

Tab. 5 Chemické složení oceli 52SiCrNi5 [12]

Označení oceli	Hmotnostní podíl v %							
	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Ni	Cu + Sn
52SiCrNi5	0,49	1,2	0,70	0,025	0,025	0,7	0,5	Cu + 10Sn ≤0,60
	–	až	–			–	až	
	0,56	1,5	1			1	0,7	

2.3.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 6.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti oceli 52SiCrNi5 [12]

Označení oceli	Teplota kalení [°C]	Prostředí ochlazení	Teplota popouštění [°C]	R _{p0,2} [MPa] min.	R _m [MPa]	A [%] min.	Z [%] min.	Nárazová práce při 20°C KU [J] min.
52SiCrNi5	840 – 870	Olej	400 – 450	1300	1450 – 1750	6	35	10

2.4 54SiCr6 (1.7102)

Jakost 54SiCr6 je nízkolegovaná ušlechtilá křemík – chromová ocel pro zušlechťované pružiny. Technicko dodací podmínky se řídí dle normy EN 10089 označení dle ČSN 14 260. Tato jakost se používá pro středně namáhané pružiny a pružné elementy do automobilů, kolejová vozidla a kroužkové pružiny. [15] [21]

2.4.1 Chemické složení

Chemické složení dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 7.

Tab. 7 Chemické složení oceli 54SiCr6 [12]

Označení oceli	Hmotnostní podíl v %						
	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Cu + Sn
54SiCr6	0,51	1,2 – 1,6	0,50	0,025	0,025	0,50	$\text{Cu} + 10\text{Sn} \leq 0,60$
	–		–			–	
	0,59		0,8			0,8	

2.4.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dle normy ČSN EN 10089 uvádí tabulka č. 8.

Tab. 8 Mechanické vlastnosti oceli 54SiCr6 [12]

Označení oceli	Teplota kalení [°C]	Prostředí ochlazení	Teplota popouštění [°C]	$R_{p0,2}$ [MPa] min.	R_m [MPa]	A [%] min.	Z [%] min.	Nárazová práce při 20°C KU [J] min.
54SiCr6	840–870	Olej	400 – 450	1300	1450 – 1750	6	25	8

Jakosti uvedené v kapitolách 2.3 a 2.4 budou porovnávány s materiály (kapitoly 2.1 a 2.2) zavedených a odzkoušených pro výrobu šroubových pružin. Tyto čtyři materiály budou porovnávány mezi sebou na základě předepsaných zkoušek.

2.5 Vliv legujících prvků na tepelné zpracování oceli

Popsány budou chemické prvky, které jsou obsaženy ve zvolených čtyřech jakostech, které budou použity pro experiment.

2.5.1 Křemík

Legující prvek křemík řadíme do skupiny silně feritotvorných prvků. Rozpustnost v železe α je vysoká. Křemík v oceli karbidy netvoří, ale rozpouští se úplně až ve feritu, což má za následek zvyšování pevnosti. Celkovou prokalitelnost oceli zvyšuje méně než chrom a mangan. Silně zvyšuje elasticitu, zvyšuje odolnost proti popouštění a má sklon k oduhličení povrchu materiálu, díky kterému je v oceli z hlediska nárazové práce škodlivý. Platí přímá úměra, že čím více je křemíku obsaženo v materiálu, tím menší je nárazová práce. Při procesu popouštění křemík posouvá hranici začátku rozpadu martenzitu k vyšším teplotám. Protože při popouštění křemíkových ocelí nastává popouštěcí křehkost, je tedy nutné tyto materiály popouštět nad pásmem popouštěcí křehkosti. Po výdrži na této teplotě musíme pak materiál rychle ochladit. [16] [17] [18] [22]

2.5.2 Nikl

Nikl řadíme do skupiny austenitotvorných prvků. V oblasti austenitu se rozpustí cca 55 % niklu. Při legování oceli niklem se zpomaluje fázová přeměna $\gamma \rightarrow \alpha$. V rovnovážném diagramu železo – uhlík posouvá nikl eutektoidní bod doleva k nižším hodnotám. Při tepelném zpracování oceli nikl zvyšuje prokalitelnost, ale oproti chromu je to v podstatně menší míře. Nikl zvyšuje pevnost více než chrom, ale méně než mangan a křemík. Má také za následek zvýšení meze kluzu a ovlivňuje také hodnoty vrubové houževnatosti, které zvyšuje. Další jeho kladnou vlastností je, že působí proti oduhličení povrchu. V normalizačně žíhaných ocelích zjemňuje perlit. Nikl je drahý, proto není zvýšení pevnosti úměrné ceně. Nikl se používá hlavně v ocelích, které mají mít vysokou houževnatost zejména při nízkých teplotách. [17] [18] [22]

2.5.3 Chrom

Chrom řadíme do skupiny feritotvorných prvků. Díky chromu se v oceli zvyšuje celkově prokalitelnost oceli při tepelném zpracování. Slitiny s vyšším obsahem chromu se tak vyznačují feritickou strukturou s vyloučenými karbidy. Chrom se do oceli přidává i pro zvýšení korozních vlastností materiálu. Dále chrom zvyšuje ořezavzdornost, pevnost za tepla a tvrdost HRC a HB. [17] [18] [22]

2.5.4 Mangan

Legující prvek mangan patří mezi prospěšné prvky. Mangan patří také do skupiny prvků tzv. austenitotvorných. Ze stavového diagramu Fe – Mn lze říct, že slitiny, které obsahují více než 35 % manganu, u nich zůstává austenit zachován při pokojové teplotě a slitiny mají austenitickou, nemagnetickou strukturu. Mangan se vyznačuje malou difuzní strukturou. Mangan rozpuštěný ve feritu, zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti a snižuje tažnost. V rovnovážném diagramu železo-cementit posouvá bod E doprava, tj. zvyšuje rozpustnost uhlíku v austenitu. Protože se eutektoidní teplota současně snižuje a zjemňují se lamely perlitu, zvyšuje se pevnost. Mangan z hlediska tepelného zpracování zpomaluje transformaci austenitu v perlitické i bainitické oblasti. Díky tomu se zvyšuje také prokalitelnost a současně se zvyšuje i doba stability austenitu. Manganové oceli jsou citlivé na zhrubnutí zrna, takže je nutné při tepelném zpracování dodržovat austenitizační teplotu. [18] [19] [22]

2.5.5 Molybden

Molybden patří mezi feritotvorné prvky. Část molybdenu se rozpouští ve feritu, jehož tvrdost zvyšuje, část tvoří karbidy. Molybden můžeme zařadit mezi středně silné karbidotvorné prvky. Při nízkém obsahu molybdenu se tvoří podvojný cementit $(Fe, Mo)_3C$, ve kterém mohou být rozpuštěna až 4% molybdenu. Molybden prodlužuje dobu, po kterou je stabilní při vyšších teplotách. Molybden také snižuje začátek a konec martenzitické transformace. Po zakalení zvyšuje stabilitu martenzitu, tj. posouvá jeho rozpad k vyšším popouštěcím teplotám. Tento vliv je možno využít u zakalených ocelí, pokud je třeba žíhat na snížení pnutí při vyšších teplotách. U zušlechťovaných ocelí snižuje přísada 0,2 až 0,3 % Mo vysokoteplotní popouštěcí křehkost. [18] [19] [22]

2.5.6 Vanad

Vanad patří mezi silně feritotvorné prvky. Vanad tvoří s uhlíkem velmi stabilní karbid VC. Karbidy vanadu mají vysokou tvrdost, pohybující se okolo 2500HV. Při nízkém obsahu vanadu se tvoří jemné globulární karbidy, které zpomalují růst zrna austenitu. Vliv vanadu na mechanické vlastnosti závisí ve velké míře na kalicí teplotě, tj. na stupni rozpuštění vanadu v austenitu. Pokud se kalí oceli s přísadou vanadu za normální teploty, získávají se menší tvrdosti, protože část uhlíku zůstává vázána jako karbid vanaditý. Příklad přísady vanadu se obvykle kombinuje s jinými legujícími prvky. V ocelích na zušlechťování bývá obsah vanadu asi 0,1 %. Vyšší obsah vanadu mají žárupevné oceli a oceli odolné proti vodíkové korozi. [18] [19] [22]

2.6 Rozbor lomů u šroubových pružin

Kapitola se zabývá příčinami a vznikem lomu na šroubových pružinách, plus jsou uvedeny praktické ukázky lomu.

2.6.1 Příčiny vzniku lomů

Příčin vzniku lomu na šroubových pružinách i obecně na jakémkoliv materiálu může být několik. Již v samotném počátku výroby při odlévání základního materiálu mohou vznikat zárodky lomu. Do základního materiálu se mohou dostat různé nečistoty, vměstky, nebo se v základním materiálu můžou samy tvořit malé mikro trhlinky, které v pozdější fázi zpracování materiálu a při výrobě pružin způsobí vznik lomu a tím znehodnocení pružiny. [20]

Charakter lomu může být interkrystalický tedy podél hranic zrn, nebo transkrystalický lom (přes zrna), určit, který lom lze považovat za horší není tak jednoduché. Může se zdát, že transkrystalický je pro nás horší z hlediska toho, že lom vzniká přes zrna, tím pádem je jeho cesta přímá a vznikne rychleji než interkrystalický, ale na druhou stranu nám to značí, že materiál je dobře tepelně zpracovaný a lom vznikl pravděpodobně z důvodu přetížení pružiny (špatná konstrukce pružiny nebo špatné konstrukční uložení), nebo vady už v základním materiálu. U interkrystalického lomu je tomu naopak. Pokud nám vznikne interkrystalický lom, značí nám to nedostatky většinou ve výrobě. Interkrystalický lom vzniká nejčastěji u křehkých materiálů. Vznik lomu při samotné výrobě pružin může podpořit mnoho faktorů. Jak již bylo výše uvedeno, může být závadný vstupní základní materiál, obsahující např. vměstky, zaválcované okraje nebo povrchové vady, které vznikly technologickým zpracováním pružin. Další příčinou vzniku lomu může být vznik tepelně ovlivněné oblasti pod povrchem materiálu, která vznikne broušením čel šroubové pružiny.

K lomu dochází jak v závěrných, tak i v činných závitech. V závěrných závitech vzniká lom většinou v důsledku chyb ve výrobě pružiny při navíjení, broušení, pálení, nebo při špatné konstrukci zařízení. U činných závitů dochází k lomu vlivem velkého napětí a deformací. Za iniciaci lomu lze považovat místo tepelného ovlivnění, vrub, vměstky v materiálu, popřípadě poškození povrchu materiálu. [20]

2.6.2 Zkoušky vyhodnocování lomu

Vyhodnocení lomů probíhá pomocí různých zkoušek. Požadavky na vyhodnocení lomů se mohou lišit. Mezi základní zkoušky patří makroskopické a mikroskopické zkoušky. Při makroskopických zkouškách se vyhodnocuje vizuální vzhled lomu a na jakém místě pružiny se lom nachází, a zda lom vznikl z důsledku vady na povrchu nebo pod povrchem. U mikroskopické zkoušky se pomocí metalografického výbrusu vyhodnocuje charakter lomu, obsah vměstků materiálu, mikročistota, mikrostruktura, velikost zrna, oduhličení a tvrdost na povrchu a průřezu. [20]

2.6.3 Praktické příklady lomů

Na obrázcích č. 9–10 jsou uvedeny detaily lomu na základě deformace povrchu pružiny od otláčení a vznik na závěrném závitu pružiny.



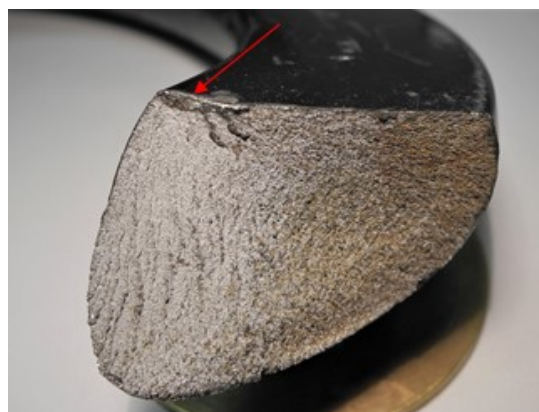
Obr. 9 Pohled na lom po otláčení



Obr. 10 Pohled na lom a otláčení



Obr. 11 Horní pohled na lom v závěrném závitu



Obr. 12 Čelní pohled na lom a místo vzniku lomu v závěrném závitu

Na obrázcích č. 11 a 12 je lom, který pravděpodobně mohl vzniknout na základě tepelně ovlivněné tenké vrstvičky (0,003 mm) vlivem broušení konce pružin.

Na obrázcích č. 13, 14, 15, 16, 17 jsou různé typy lomů různých příčin vzniku.



Obr. 13 Lom na aktivním závitě pružiny



Obr. 14 Lom na aktivním závitě pružiny
vlivem vrubu



Obr. 15 Lom na závěrném závitě šroubové
pružiny



Obr. 16 Lom na závěrném závitě šroubové
pružiny



Obr. 17 Lom na aktivním závitě pružiny
šroubové pružiny

3 Experimentální část práce

Experimentální část práce se zaměřuje na kontrolu jakosti vstupních materiálů pro výrobu pružin a možnosti zavedení nových jakostí materiálů do stávající výroby firmy. Jednotlivé kapitoly blíže specifikují zvolené materiály, popisují jejich chemické složení a mechanické vlastnosti před samotnou výrobou. Následně je popsán postup výroby pružin a kontrola mechanických vlastností a mikrostruktury, včetně zkoušek a vyhodnocení výsledků.

3.1 Volba materiálů

Zvolené materiály pro experiment byly stanoveny na základě požadavků zadavatele práce, který by chtěl rozšířit sortiment dodávaných jakostí materiálů. Na základě podobných mechanických vlastností po tepelném zpracování byly vybrány křemíkové materiály jakosti 54SiCr6 a 52SiCrNi5. U křemíkových ocelí vznikl názor, že by mělo docházet díky křemíku k velkému oduhličení povrchu materiálu, což je nežádoucí jev. Proto byl mezi těmito dvěma materiály vybrán i jeden, který obsahuje nikl, který by měl podle předpokladů oduhličení odstranit neboli mu částečně zabránit.

3.1.1 Kontrola chemického složení

Pro ověření jakosti materiálů 54SiCr6 a 52SiCrNi5 byla provedena kontrolní chemická analýza, která byla následně srovnána s atesty materiálů a normativními požadavky dle ČSN EN 10089 (Tab. 9, 10).

Tab. 9 Chemický rozbor jakosti 54SiCr6 [12]

Chemické složení	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Sn [%]
Dle ČSN EN 10089	0,51 až 0,59	0,5 až 0,8	1,2 až 1,6	max. 0,025	max. 0,025	≤0,60	-	0,5 až 0,8	-	-	≤0,60
Vzorku č. 11	0,537	0,70	1,45	0,008	0,0096	0,020	0,015	0,652	0,005	0,004	0,004
Dle atestu	0,53	0,70	1,42	0,012	0,009	0,02	0,02	0,67	-	-	-

Tab. 10 Chemický rozbor jakosti 52SiCrNi5 [12]

Chemické složení	C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cu [%]	Ni [%]	Cr [%]	Mo [%]	V [%]	Sn [%]
dle ČSN EN 10089	0,49 až 0,56	0,7 až 1	1,2 až 1,5	max. 0,025	max. 0,025	≤0,60	0,5 až 0,7	0,7 až 1	-	-	≤0,60
Vzorek č. 21	0,538	0,81	1,31	0,013	0,0239	0,180	0,555	0,816	0,054	0,004	0,015
Dle atestu	0,53	0,78	1,36	0,016	0,024	0,19	0,57	0,81	-	-	-

Jak je patrné z výše uvedených tabulek č. 9 a 10, výsledky chemické analýzy u obou jakostí materiálu odpovídají normativním požadavkům a zvolený experimentální materiál odpovídá i atestu od výrobce. Atesty jednotlivých materiálů jsou k nahlédnutí v příloze A.

3.1.2 Mechanické vlastnosti

Zkouškou tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1 a zkouškou rázem v ohybu dle normy ČSN EN ISO 148-1 byly zkoušeny mechanické vlastnosti materiálů, které jsou uvedeny v tabulkách č. 11 a 12.

Tab. 11 Výsledky zkoušky tahem a nárazové práce jakosti 54SiCr6

Označení vzorku	Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	Pevnost R _m [MPa]	Tažnost A [%]	Zúžení Z [%]	Nárazová práce KU ₂ [J]	Ø nárazové práce [J]
11	527	952	17,6	43,9	6, 8, 6	6,7
12	525	952	17,6	44,1	8, 8, 7	7,7
13	542	958	18,4	43,0	6, 6, 6	6,0
14	549	968	13,2	37,6	6, 6, 6	6,0
15	527	952	16,4	39,2	8, 6, 6	6,7

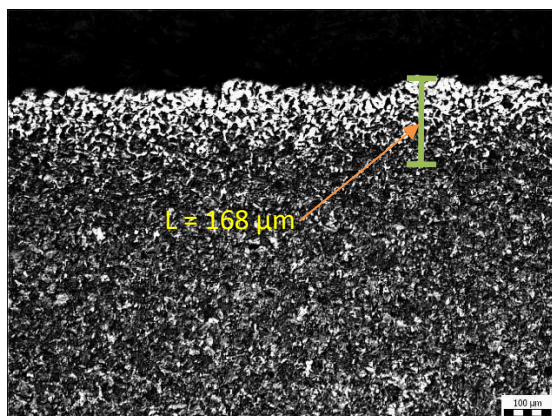
Tab. 12 Výsledky zkoušky tahem a nárazové práce jakosti 52SiCrNi5

Označení vzorku	Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	Pevnost R _m [MPa]	Tažnost A [%]	Zúžení Z [%]	Nárazová práce KU ₂ [J]	Ø nárazové práce [J]
21	559	916	19,8	41,3	10, 4, 8	7,3
22	565	943	17,4	39,0	6, 5, 6	5,7
23	551	929	19,8	43,6	4, 6, 5	5,0

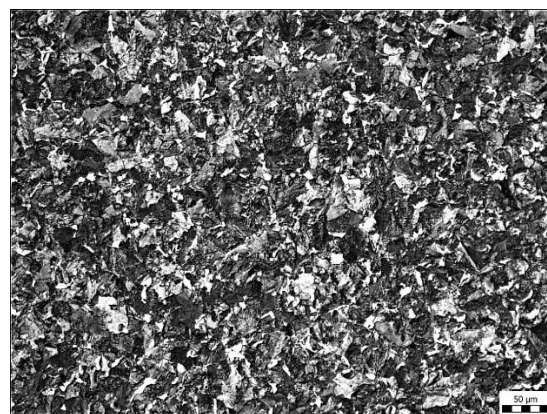
Výše uvedené zkoušení mechanických vlastností bylo provedeno z důvodu popisu výchozího stavu materiálů a budou použity jako podklad pro tepelné zpracování před samotnou výrobou a následného srovnání mechanických vlastností vyrobených pružin.

3.1.3 Metalografické šetření

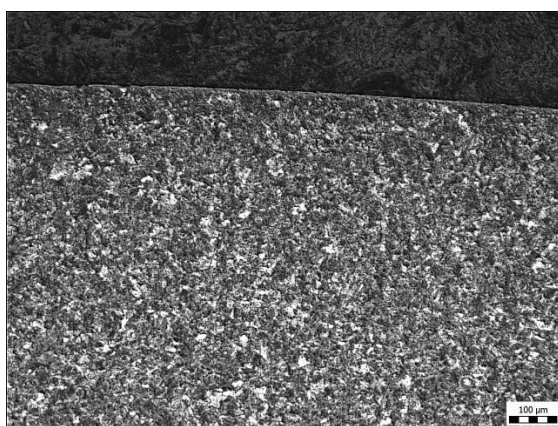
U obou jakostí (54SiCr6 a 52SiCrNi5) základních materiálů byla provedena metalografická kontrola povrchu a mikrostruktura pod povrchem. U vzorku č. 12 (jakost 54SiCr6) bylo na povrchu patrné částečné oduhličené pásmo v délce 168 μm , které mohlo vzniknout už při výrobě základního materiálu a pod povrchem se vyskytovala feriticko – perlitická mikrostruktura v poměru 5% ferit a 95% perlitu (Obr. 18 a, b). U vzorku č. 21 (jakost 52SiCrNi5) se vyskytovala na povrchu deformovaná vrstva v hloubce 8 μm po loupání, oduhličení se nevyskytovalo. Mikrostruktura pod povrchem ukazuje lamelární perlit jevící známky popuštění (známka částečného rozpadu). Procentuální rozložení je 2% feritu a 98% perlitu (Obr. 19 a, b). Zbylé mikrostruktury jsou k nahlédnutí v příloze B.



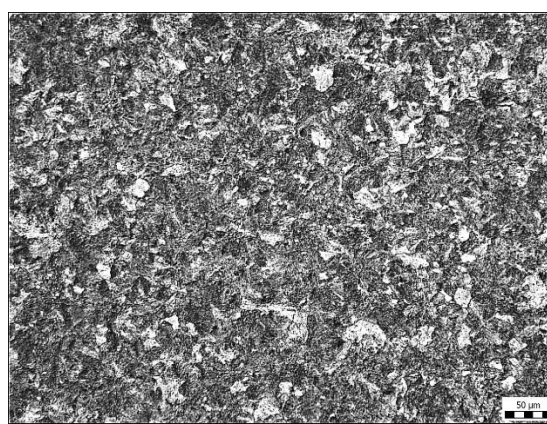
Obr.18 a Detail povrchu vzorku č. 12



Obr. 18 b Mikrostruktura vzorku č. 12 pod povrchem



Obr. 19 a Detail povrchu vzorku č. 21



Obr. 19 b Mikrostruktura vzorku č. 21 pod povrchem

3.2 Zmapování doporučených podmínek pro tepelné zpracování křemíkových ocelí

Tepelné zpracování křemíkových ocelí můžeme rozdělit do tří fází. První fází je normalizační žíhání s ohřevem na teplotu 870°C a následným řízeným ochlazením na vzduchu. Druhý způsob, který můžeme použít je klasické kalení s ohřevem na teplotu mezi 840 – 870°C s ochlazením v olejové lázni. Jako třetí způsob tepelného zpracování lze použít popouštění s ohřevem na teplotu 400 – 450°C s následným ochlazením na vzduchu. Tepelné zpracování provádíme z důvodu docílení vyhovujících mechanických vlastností materiálu. Vlastnosti materiálu závisí také na chemickém složení a u materiálů obsahující křemík dochází k oduhličení povrchu. Důsledkem může být i snížení mechanických vlastností. [2] [22] [23]

K oduhličení pružin dochází při ohřevu v kyslíkové atmosféře a projevuje se změnou koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě pružiny. Křemík jako takový přispívá hodně k oduhličení materiálu, což je nežádoucí jev, a je snaha tomuto oduhličení zabránit, a to buď přidáním do materiálu jiného prvku (například niklu, který oduhličení snižuje), nebo úpravou pecní atmosféry pomocí jiných plynů. [2] [22] [23]

Parametry tepelného zpracování se obecně stanovují podle ARA diagramů, nebo pomocí předepsaných teplot v dané normě pro konkrétní materiál. ARA diagram se stanovuje experimentálně pro každý materiál zvlášť. Pomocí ARA diagramu dokážeme předpokládat, jakou výslednou strukturu bude materiál po tepelném zpracování mít. Podle požadované struktury si dokážeme odečíst z diagramu požadovanou teplotu, na kterou je potřeba materiál zahřát a čas, za který musíme materiál ochladit (zakalit). [2] [22] [23]

Norma ČSN EN 10089 uvádí informativní doporučené hodnoty pro dané jakosti, za kterých by se měly křemíkové materiály tepelně zpracovávat. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 13.

Tab. 13 Informativní hodnoty tepelného zpracování dle normy ČSN EN 10089 [12]

Označení oceli		Teplota kalení [°C] ± 10°C	Prostředí ochlazení	Teplota popouštění [°C] ± 10°C
Značka	Číselné označení			
54SiCr6	1.8152	860	Olej	400
52SiCrNi5	1.7117	860	Olej	450

3.3 Výroba pružin

Výroba pružin z jakosti 54SiCr6 a 52SiCrNi5 a tepelné zpracování bylo provedeno dle používaných postupů zadavatele práce. Pro doplnění a porovnání vhodnosti používaných materiálů byl experiment doplněn o níže uvedené jakosti materiálu:

- 1) **Standartní materiály** – 51CrV4 a 52CrMoV4.
- 2) **Nově testované materiály** – 54SiCr6 a 52SiCrNi5.

Základní parametry zkoušených materiálů, uvádí tabulka č. 14.

Tab. 14 Základní parametry zkoušených materiálů

Označení jakosti materiálu	Průměr [mm]	Délka tyčí [mm]	Počet tyčí [mm]
51CrV4	34	1500	3
52CrMoV4	35,5	1500	3
54SiCr6	34	1500	3
52SiCrNi5	33	1500	3

Experiment probíhal na lince tepelného zpracování CNC navíjení. Na lince se rovněž nachází ohřívací pec, CNC navíječka, dohřívací pec, podávací robot pružin, kalící lázeň a popouštěcí pec. Pružiny z nově navržených materiálů s obsahem křemíku byly vyrobeny a tepelně zpracovány standardním způsobem, z důvodu možnosti ponechání nastavených parametrů linky. Pro snadnější identifikaci vzorků byly jednotlivé tyče vloženy na dopravník v předepsaném pořadí. Celková doba jednotlivých operací byla sledována pomocí stopek a doba výdrže v pecích byla odečtena ze softwaru. Časová zátěž jednotlivých kroků byla zpracována do tabulky. Teploty naměřené v pecích byly odečteny ze softwaru a teploty měřené mimo pec byly měřeny pomocí termokamery, nebo pomocí pyrometrů, které byly umístěny při výjezdu tyče z ohřívací pece a před kalící lázní. Naměřené teploty uvádí tabulka č. 15 v kapitole 3.3.1.

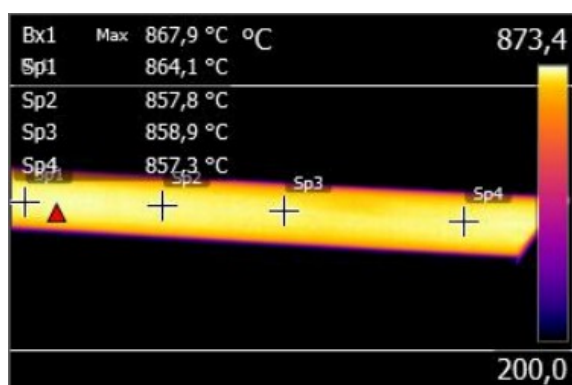
3.3.1 Materiál jakosti 54SiCr6

Jednotlivé tyče byly vloženy do ohřívací pece postupně po 3 kusech podle dané jakosti materiálu. Jako první byly vloženy do pece tyče jakosti 54SiCr6. Tyče šly za sebou v pořadí, které bylo stanoveno označením 1, 2, 3. Dále je popsán proces navíjení tyče označené číslem 3. Ukázku tyčí pro výrobu pružin uvádí obrázek č. 18.



Obr. 18 Přípravené tyče pro výrobu pružin

Tyč byla v peci ohřáta na teplotu 920°C po dobu 27,2 minut. Po této době z pece vyjela na dopravník ohřátá tyč, u které byla ihned změřena teplota pomocí laserového pyrometru, který se nachází asi 1 metr od dvířek pece a začal se od tohoto místa měřit čas, jak dlouho bude trvat, než se tyč promění v pružinu a vloží se do dohřívací pece. Na tomto místě byla naměřena teplota tyče pomocí pyrometru. Tyč dále pokračovala k dorazu dopravníku, kde byla opět změřena teplota pomocí termokamery (Obr. 19). V tomto místě byla naměřena průměrná teplota 867,9°C a byla zde pořízena fotografie dané tyče (Obr. 20).

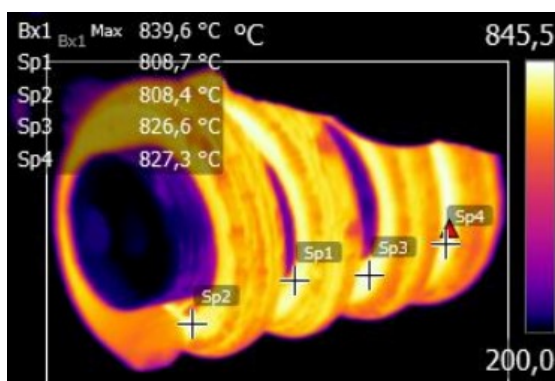


Obr. 19 Teplota tyče (doraz dopravníku)



Obr. 20 Teplota tyče (doraz dopravníku)

Další operací bylo navinutí tyče na trn o průměru 82 mm a tím docílení výsledného tvaru pružiny. Doba navíjení trvala 21 vteřin. Po navinutí bylo na pružinu vyraženo pořadové číslo 3 pomocí raznice, aby byla snadná identifikace v pozdější fázi experimentu, o kterou pružinu se jedná. Po naražení identifikačního čísla, byla opět změřena teplota pružiny, která byla pořád na trnu, pomocí termokamery (Obr. 21) a byl zde pořízen opět snímek (Obr. 22). Průměrná teplota po navinutí byla 839,6°C a snímek je možno vidět na obrázku č. 21.

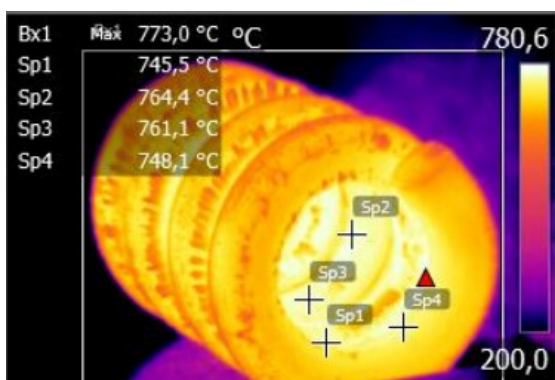


Obr. 21 Měření teploty pružiny



Obr. 22 Pružina na trnu

Z trnu byla pružina sejmuta pomocí manipulátoru a byla přesunuta před dohřívací pec, kde byla opět změřena teplota pružiny (Obr. 23) a pořízen snímek (Obr. 24). Průměrná teplota před dohřívací pecí byla 773°C.



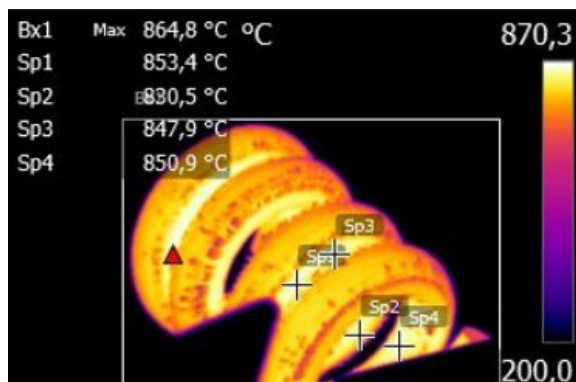
Obr. 23 Teplota pružiny před dohřívací pecí



Obr. 24 Pružina před dohřívací pecí

Operace mezi ohřívací a dohřívací pecí trvala 1 minutu a 56 vteřin. Následovalo tepelné zpracování pružiny v dohřívací peci při teplotě 880°C a výdrži na ní 6 minut a 15 vteřin. Z ohřívací pece byla pružina vytažena robotem, který jí přemístil do kolébky před kalicí lázeň. Zde byla opět změřena teplota, a to dvojím způsobem.

První způsob byl proveden pomocí laserového pyrometru. Druhý způsob měření byl proveden pomocí termokamery. Průměrná teplota z termokamery byla 864,8°C (Obr. 25) a snímek pružiny je možno vidět na obrázku č. 26. Následovalo kalení pružiny v kalící lázni s olejem. Doba mezi vyjmutím pružiny robotem z dohřívací pece po vložení do kalící lázně byla stanovena na 22 vteřin.



Obr. 25 Měření teploty před kalením



Obr. 26 Pružina před kalením

Teplota oleje byla 43°C a výdrž na teplotě 14 minut. Následovalo vyjmutí pružiny z kalící lázně a změření teploty termokamerou (Obr. 27). Průměrná teplota naměřená po vyjmutí z oleje byla 66,4°C.



Obr. 27 Teplota pružiny po kalení

Dalším technologickým procesem bylo popouštění při teplotě 430°C po dobu 2 hodin a 15 minut a zchlazení vodní sprchou. Výslednou pružinu, která je tepelně zpracována a označená identifikačním číslem 3 lze vidět na obrázku č. 28.



Obr. 28 Výsledná pružina č.3

Ostatní jakosti ocelí byly zpracovány pomocí obdobného tepelného zpracování. Fotky z termokamery a výsledných šroubových pružin jsou k nahlédnutí v příloze C.

Tab. 15 Tabulka změřených teplot při výrobě pružin

Experiment		Označení jakosti materiálu: 54SiCr6 Ø 34 mm									
Jakost materiálu	Označení tyče	Nastavená teplota v ohřívací peci [°C]	Ø Teplota při výjezdu z pece [°C]	Ø Teplota při ražení termokamera [°C]	Ø Teplota po navinutí z termokamery [°C]	Ø Teplota před dohřívací pecí z termokamery [°C]	Teplota v dohřívací peci [°C]	Teplota pyrometr [°C]	Ø Teplota z termokamery před kalením [°C]	Ø Teplota při vyjetí z oleje ter. [°C]	Teplota v popouštěcí peci [°C]
54SiCr6	11/1–1	920	875,5	876,1	855,76	783,4	880	852	-	64	430+-5
54SiCr6	11/2–2	920	875	877,3	854,7	775,8	880	-	875,6	64,14	430+-5
54SiCr6	12/1–3	920	883	867,9	839,6	773	880	839	864,7	66,4	430+-5
		Označení jakosti materiálu: 52SiCrNi5 Ø 33 mm									
52SiCrNi5	21/1–4	920	860	866,2	855,8	759,4	880	846	877,3	66,02	430+-5
52SiCrNi5	21/2–5	920	874	854,1	862,4	797,8	880	850	886,6	63,38	430+-5
52SiCrNi5	21/3–6	920	876	855,7	862,5	766,9	880	854	878,7	66,3	430+-5
		Označení jakosti materiálu: 51CrV4 Ø34 mm									
51CrV4	31/1–7	920	879	875,4	862,3	826,6	880	853	882,4	65,66	430+-5
51CrV4	31/2–8	920	878	866,7	856,4	798,7	880	861	887,4	64,16	430+-5
51CrV4	32/1–9	920	878	861,1	847,9	787,1	880	855	888,1	68,6	430+-5
		Označení jakosti materiálu: 52CrMoV4 Ø 35,5 mm									
52CrMoV4	41/1–10	920	875	880,9	861,86	-	880	846	876,06	76,48	430+-5
52CrMoV4	41/2–11	920	879	881,5	861,3	789,76	880	854	873,66	73,88	430+-5
52CrMoV4	42/1–12	920	869	883,2	860,1	790,8	880	853	874,7	79,2	430+-5

Pružiny označené zelenou barvou byly použity na mechanické zkoušky a metalografické šetření

4 Kontrola mechanických vlastností a metalografické šetření zhotovených pružin

V kapitole jsou zhodnoceny výsledky zkoušek mechanických vlastností a metalografického šetření.

4.1 Zkoušky mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti materiálu byly prověřovány zkouškou tahem, rázem v ohybu a tvrdostí.

Pro zkoušku rázem v ohybu bylo potřeba odebrat části pružin, ze kterých byla vyrobena zkušební tělíska. Na obrázcích č. 29 až 32 jsou zdokumentovány odebrané vzorky pro zkoušku rázem v ohybu. Číslo na vzorku znamená označení pružiny a písmeno „V“ označuje zkušební metodu – zkoušku rázem v ohybu.



Obr. 29 Vzorek pro zkoušku rázem v ohybu
z pružiny č. 3



Obr. 30 Vzorek pro zkoušku rázem v ohybu
z pružiny č. 6



Obr. 31 Vzorek pro zkoušku rázem v ohybu
z pružiny č. 9



Obr. 32 Vzorek pro zkoušku rázem v ohybu
z pružiny č. 12

Obdobným způsobem byly odebrány vzorky pro zkoušku tahem. Na obrázcích č. 33 a 34 jsou zdokumentovány odebrané vzorky pro zkoušku tahem. Číslo na vzorku znamená označení pružiny a písmeno „T“ označuje zkušební metodu – zkoušku tahem.

Obr. 33 Vzorek pro zkoušku tahem z pružiny
č. 3Obr. 34 Vzorek pro zkoušku tahem z pružiny
č. 6

Stejným způsobem byly připraveny zkušební vzorky 9T a 12T.

4.1.1 Vyhodnocení mechanických vlastností

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny výsledky zkoušky tahem a rázem v ohybu (Tab. 16), které je možno porovnat s normativními požadavky dle normy ČSN EN 10089 (Tab. 17).

Tab. 16 Výsledky mechanických zkoušek

Jakost materiálu	Označení vzorku	Mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$ [MPa]	Mez Pevnosti v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%]	Zúžení Z [%]	Nárazová práce KU_2 [J]	Ø ze 3 zkoušek nárazové práce [J]
54SiCr6	3T, 3V	1406	1606	2	22,2	11, 11, 11	11
52SiCrNi5	6T, 6V	1569	1772	4,8	32,8	12, 13, 14	13
51CrV4	9T, 9V	1431	1531	8,8	37,2	14, 14, 14	14
52CrMoV4	12T, 12V	1579	1737	8,0	39,2	15, 13, 12	13,3

Tab. 17 Hodnoty mechanických vlastností dle ČSN EN 10089 [12]

Označení oceli	Mez kluzu v tahu $R_{p0,2}$ [MPa] min.	Mez Pevnosti v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%] min.	Zúžení Z [%] min.	Nárazová práce při 20 °C KU_2 [J]
54SiCr6	1300	1450 až 1750	6	25	8
52SiCrNi5	1300	1450 až 1750	6	35	10
51CrV4	1200	1350 až 1650	6	30	8
52CrMoV4	1300	1450 až 1750	6	35	10

Vyhodnocení jednotlivých vzorků:

Vzorek č. 3 (jakost 54SiCr6) dosahoval vyhovujících hodnot dle ČSN EN 10089 u meze kluzu v tahu $R_{p0,2} = 1406$ MPa, u meze pevnosti v tahu $R_m = 1606$ MPa a nárazové průměrné práce $KU_2 = 11$ J. Za nevyhovující hodnoty můžeme považovat tažnost $A = 2$ % a zúžení $Z = 22,2$ %. Nevyhovující hodnoty je možno přičítat chybnému měření, špatně vyrobenému vzorku. Z výsledků je možné konstatovat, že vzorek je nevyhovující a navrhnout nápravné opatření.

Vzorek č. 6 (jakost 52SiCrNi5) dosahoval vyhovujících hodnot dle ČSN EN 10089 u meze kluzu v tahu $R_{p0,2} = 1569$ MPa a nárazové průměrné práce $KU_2 = 13$ J. Nevyhovujících hodnot dosahoval u meze pevnosti v tahu $R_m = 1772$ MPa, tažnosti $A = 4,8$ % a zúžení $Z = 32,8$ %. V závěrečném konstatování je vzorek nevyhovující, ale je zde předpoklad udělat další měření (opakování zkoušky), výrobu nových vzorků při změně nastavení, vzhledem k vysoké pevnosti, kdy po úpravě teplot, pravděpodobně zvýšením popouštěcí teploty, což by mělo mít za následek snížení meze pevnosti v tahu, možná zvýšení nárazové práce a mělo by dojít ke zvýšení hodnot tažnosti a zúžení a dosáhnout tím vyhovujících hodnot. Z výsledků je nutno konstatovat, že je vzorek nevyhovující.

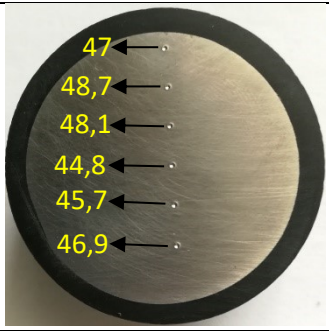
Vzorek č. 9 (jakost 51CrV4) dosahoval vyhovujících hodnot dle ČSN EN 10089 u meze kluzu v tahu $R_{p0,2} = 1431$ MPa, u meze pevnosti v tahu $R_m = 1531$ MPa, tažnosti $A = 8,8$ %, zúžení $Z = 37,2$ % a průměrné nárazové práce $KU_2 = 14$ J. Z doložených výsledků je vzorek zcela v pořádku a nevykazuje žádné nevyhovující hodnoty.

Vzorek č. 12 (jakost 52CrMoV4) dosahoval vyhovujících hodnot dle ČSN EN 10089 u meze kluzu v tahu $R_{p0,2} = 1579$ MPa, u meze pevnosti v tahu $R_m = 1737$ MPa, tažnosti $A = 8$ %, zúžení $Z = 39,2$ % a průměrné nárazové práce $KU_2 = 13,3$ J. Z doložených výsledků je vzorek zcela v pořádku a nevykazuje žádné nevyhovující hodnoty.

4.1.2 Vyhodnocení tvrdosti

V níže uvedených tabulkách (19, 20, 21 a 22) jsou uvedeny výsledky tvrdosti z dodaných vzorků.

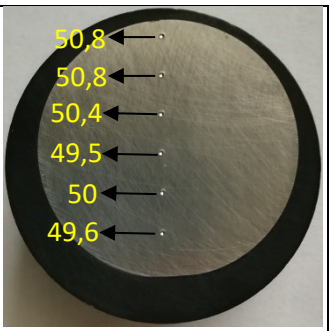
Tab. 19 Výsledky tvrdosti jakosti 54SiCr6

Materiál	Označení	Vzdálenost [mm]	Tvrdost HRC	
54SiCr6 Ø 34 mm	3	2	47	
		7	48,7	
		12	48,1	
		17	44,8	
		22	45,7	
		27	46,9	

Zhodnocení tvrdosti vzorek č. 3 (jakost 54SiCr6):

Po určení, že tvrdost povrchu materiálu je ve vzdálenosti 2 mm a je rovna 47 HRC a za střed materiálu považujeme tvrdost ve vzdálenosti 17 mm a je rovna 44,8 HRC, můžeme říct, že je tvrdost vyhovující. Dle normy ČSN EN 13298:2003 by totiž neměl nastat rozdíl mezi tvrdostí na povrchu materiálu a středem větší než 3 jednoty HRC. U jednotlivých vzdáleností lze pozorovat větší rozdíly od středu, tohle můžeme brát jako odchylku od dovolené hodnoty, tahle odchylka může být způsobena prokalitelností materiálu.

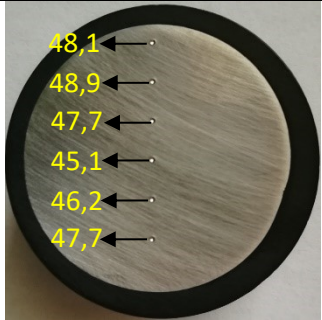
Tab. 20 Výsledky tvrdosti jakosti 52SiCrNi5

Materiál	Označení	Vzdálenost [mm]	Tvrdost HRC	
52SiCrNi5 Ø 33 mm	6	2	50,8	
		7	50,8	
		12	50,4	
		17	49,5	
		22	50	
		27	49,6	

Zhodnocení tvrdosti vzorek č. 6 (jakost 52SiCrNi5):

Po určení, že tvrdost povrchu materiálu je ve vzdálenosti 2 mm a je rovna 50,8 HRC a za střed materiálu považujeme tvrdost ve vzdálenosti 17 mm a je rovna 49,5 HRC, můžeme říct, že je tvrdost vyhovující. Dle normy ČSN EN 13298:2003 by totiž neměl nastat rozdíl mezi tvrdostí na povrchu materiálu a středem větší než 3 jednoty HRC. Vzhledem k tomu, že hodnoty naměřené v jednotlivých vzdálenostech nevykazují výraznější odchylky, je možné vyhodnotit tento vzorek jako vyhovující.

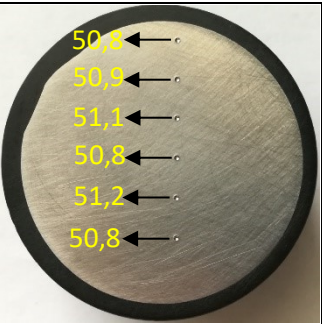
Tab. 21 Výsledky tvrdosti jakosti 51CrV4

Materiál	Označení	Vzdálenost [mm]	Tvrdost HRC	
51CrV4 Ø 34 mm	9	2	48,1	
		7	48,9	
		12	47,7	
		17	45,1	
		22	46,2	
		27	47,7	

Zhodnocení tvrdosti vzorek č. 9 (jakost 51CrV4):

Po určení, že tvrdost povrchu materiálu je ve vzdálenosti 2 mm a je rovna 48,1 HRC a za střed materiálu považujeme tvrdost ve vzdálenosti 17 mm a je rovna 45,1 HRC, můžeme říct, že je tvrdost vyhovující. Dle normy ČSN EN 13298:2003 by totiž neměl nastat rozdíl mezi tvrdostí na povrchu materiálu a středem větší než 3 jednoty HRC. Z výsledků je tedy možné vyhodnotit tento vzorek jako vyhovující.

Tab. 22 Výsledky tvrdosti jakosti 52CrMoV4

Materiál	Označení	Vzdálenost [mm]	Tvrdost HRC	
52CrMoV4 Ø 35,5 mm	12	2	50,8	
		7	50,9	
		12	51,1	
		17	50,8	
		22	51,2	
		27	50,8	

Zhodnocení tvrdosti vzorku č. 12 (jakosti materiálu 52CrMoV4):

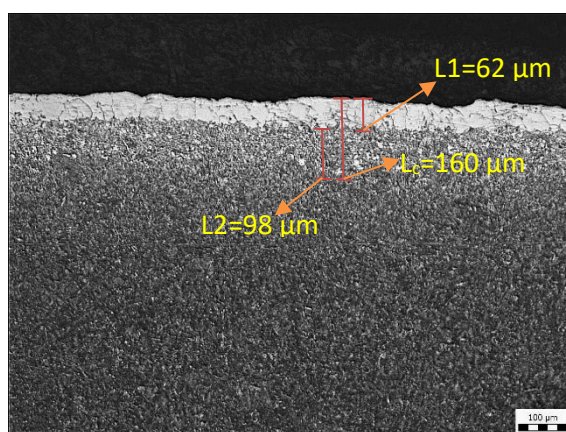
Po určení, že tvrdost povrchu materiálu je ve vzdálenosti 2 mm a je rovna 50,8 HRC a za střed materiálu považujeme tvrdost ve vzdálenosti 17 mm a je rovna 50,8 HRC, můžeme říct, že je tvrdost vyhovující. Dle normy ČSN EN 13298:2003 by totiž nastat rozdíl mezi tvrdostí na povrchu materiálu a středem větší než 3 jednoty HRC. Vzhledem k tomu, že hodnoty naměřené v jednotlivých vzdálenostech nevykazují výraznější odchylky, je možné vyhodnotit tento vzorek jako vyhovující.

4.2 Metalografické šetření

Metalografické šetření bylo provedeno v rámci školy v metalografické laboratoři. U všech jakostí (54SiCr6, 52SiCrNi5, 51CrV4 a 52CrMoV4), z kterých byly vyrobeny pružiny se provedlo metalografické šetření na kontrolu povrchu a mikrostruktury pod povrchem, vyhodnocení velikosti zrna.

4.2.1 Vyhodnocení kontroly povrchu a mikrostruktury pod povrchem

Vzorek č. 3 (jakost 54SiCr6) vykazuje na povrchu dva druhy oduhličení. Jedná se o úplné oduhličení, které se vyskytuje do hloubky 62 μm a dále o částečné velikosti 98 μm (Obr. 35 a). Celkové oduhličení zasahuje tedy do hloubky 160 μm . Mikrostruktura pod povrchem nám ukazuje, že se jedná od tzv. směs popuštěných základních struktur (martenzit + spodní bainit) (Obr. 35 b).



Obr. 35 a Detail povrchu vzorku č. 3

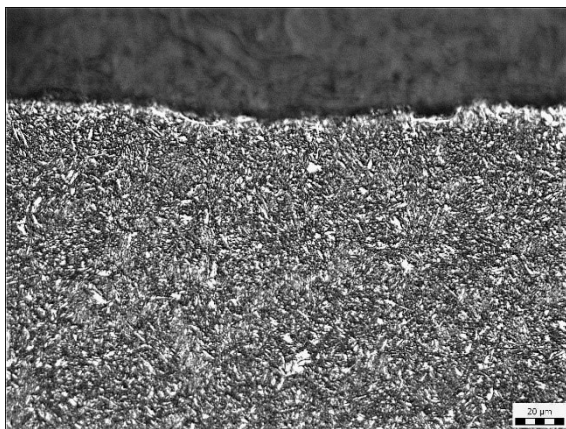


Obr. 35 b Mikrostruktura vzorku č. 3 pod povrchem

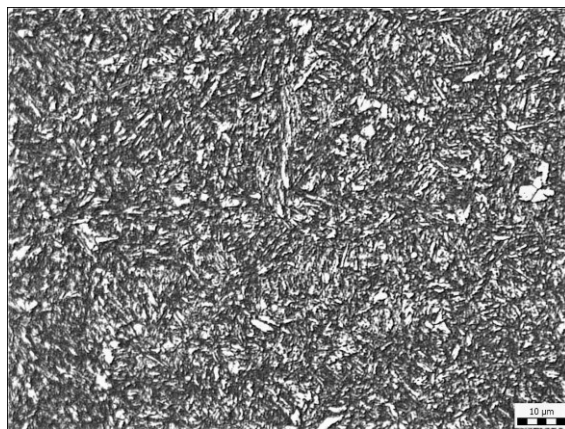
Zhodnocení vzorku č. 3 (jakost 54SiCr6):

U vzorku došlo k úplnému oduhličení povrchu do hloubky 62 μm , které je dle normy ČSN EN 13298:2003 a požadavků zákazníků nepřijatelné. Částečné oduhličení je rovno 98 μm a dle normy ČSN EN 13298:2003 je povolen jeho výskyt do 1% z celkového průměru materiálu. Výskyt mikrostruktury pod povrchem tzv. směs popuštěných základních struktur (martenzit + dolní bainit). Na základě jednotlivých výsledků, je nutno konstatovat, že je vzorek nevyhovující.

Vzorek č. 6 (jakost 52SiCrNi5) nevykazuje známky povrchového oduhličení, naopak se zde vyskytují jemné plytké nedokonalosti povrchu do hloubky 10 μm . Mikrostruktura je tvořena výrazně popuštěným martenzitem (Obr. 36 a, b).



Obr. 36 a Detail povrchu vzorku č. 6

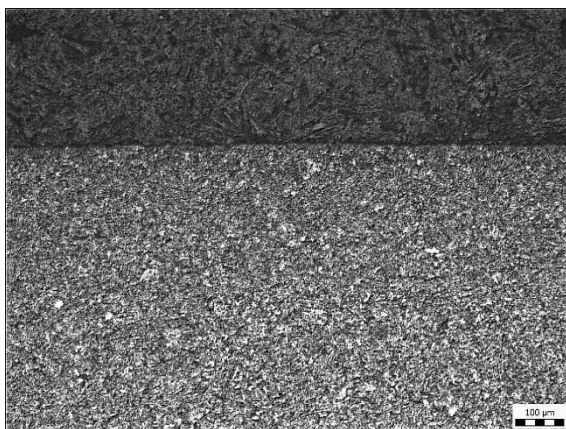


Obr. 36 b Mikrostruktura vzorku č. 6 pod povrchem

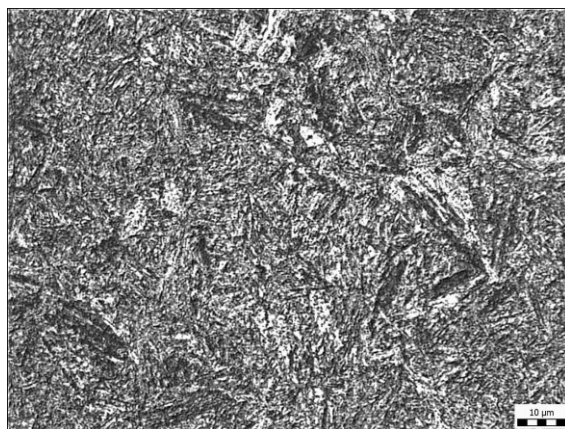
Zhodnocení vzorku č. 6 (jakost 52SiCrNi5):

U vzorku nedošlo k žádnému oduhličení povrchu, ale vyskytují se zde jemné plytké nedokonalosti cca do hloubky 10 μm , které mohly vzniknout pravděpodobně okujením, které vzniklo při tepelném zpracování. Jeho výskyt na se dá odůvodnit tím, že pružiny byly odebrány ihned po tepelném zpracování a nebyly dále opracovány např.: otryskáním. Pod povrchem se vyskytuje popuštěná martenzitická struktura, která je vyhovující. Vzorek je tedy vyhovující.

Vzorek č. 9 (jakosti 51CrV4) nevykazuje žádné povrchové oduhličení (Obr. 37 a). Mikrostruktura pod povrchem ukazuje, že se jedná o směs zákalných popuštěných struktur (martenzit + spodní bainit) (Obr. 37 b).



Obr. 37 a Detail povrchu vzorku č. 9

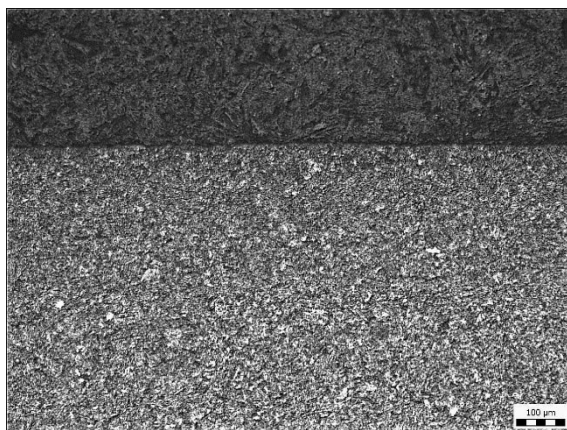


Obr. 37 b Mikrostruktura vzorku č. 9 pod povrchem

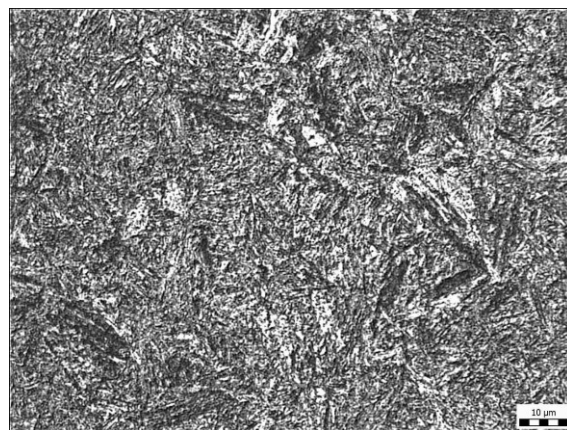
Zhodnocení vzorku č. 9 (jakost 51CrV4):

U vzorku nedošlo k žádnému oduhličení povrchu a mikrostruktura pod povrchem vykazuje tzv. směr zákalných popuštěných struktur (martenzit + bainit). Vzorek je tedy vyhovující.

Vzorek č. 12 (jakost 52CrMoV4) nevykazuje žádné oduhličení povrchu (Obr. 38 a). Jeho mikrostruktura pod povrchem ukazuje popuštěný martenzit (Obr. 38 b).



Obr. 38 a Detail povrchu vzorku č. 12



Obr. 38 b Mikrostruktura vzorku č. 12 pod povrchem

Zhodnocení vzorku č. 12 (jakost 52CrMoV4):

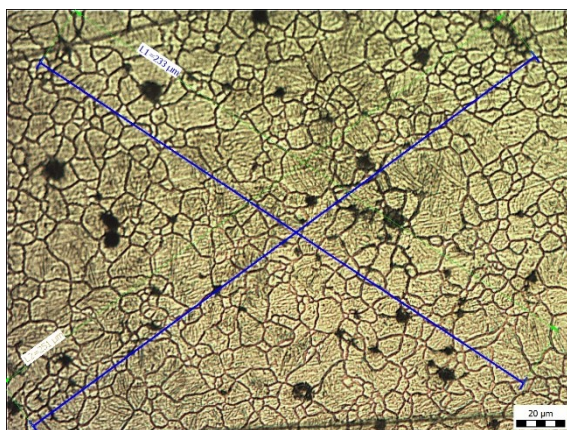
U vzorku nedošlo k žádnému oduhličení povrchu a mikrostruktura pod povrchem vykazuje popuštěný martenzit. Vzorek je tedy vyhovující.

4.2.2 Vyhodnocení velikosti zrna

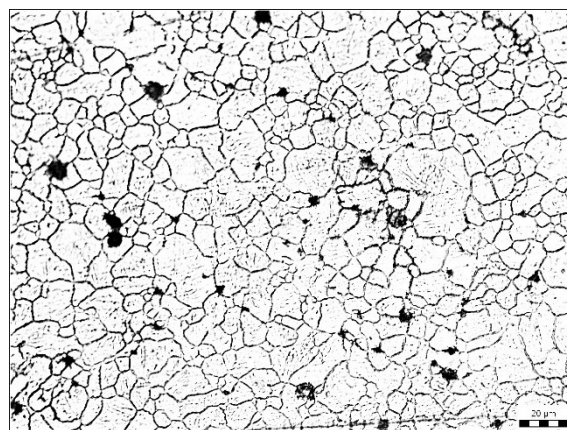
V tabulce č. 23 je uvedena velikost zrna jednotlivých jakostí dle norem ASTM E 112 a ČSN ISO 643.

Tab. 23 Výsledky velikosti zrna

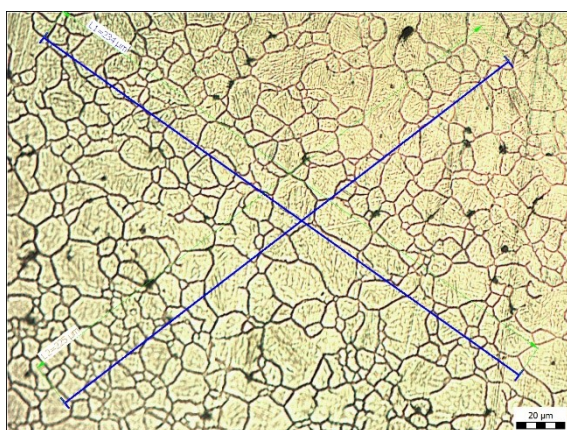
Vzorek		dle ASTM E112	- průsečíková metoda dle ČSN ISO 643	
		G	ø délka zrna v mm	Velikost zrna G
54SiCr6	3	10,5	0,0087	10
52SiCrNi5	6	10,5	0,0090	10
51CrV4	9	9,5	0,0137	9
52CrMoV4	12	9,5	0,0126	9



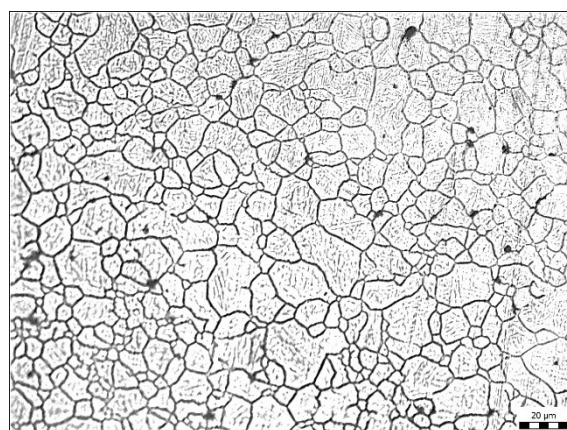
Obr. 39 Průsečíková metoda měření velikosti zrna vzorek č. 3



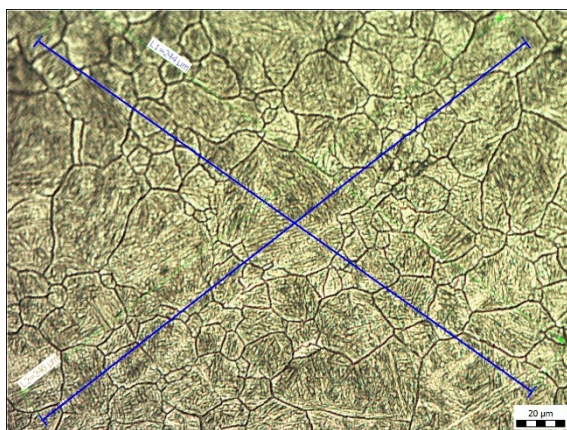
Obr. 40 Struktura zrna vzorek č. 3



Obr. 41 Průsečíková metoda měření velikosti zrna vzorek č. 6



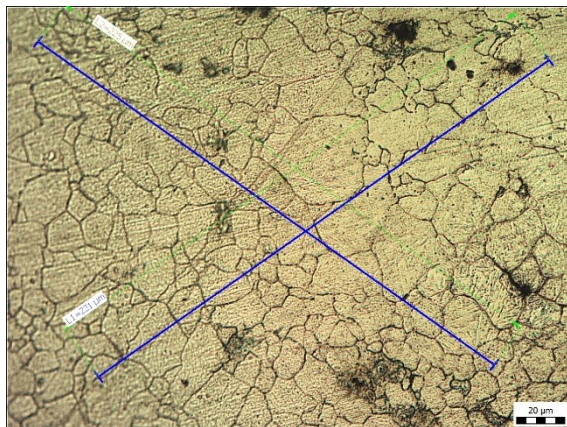
Obr. 42 Struktura zrna vzorek č. 6



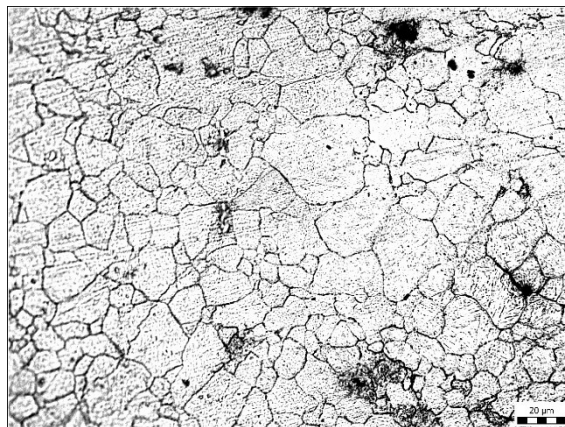
Obr. 43 Průsečíková metoda měření velikosti zrna vzorek č. 9



Obr. 44 Struktura zrna vzorek č. 9



Obr. 45 Průsečíková metoda měření velikosti zrna vzorek č. 12



Obr. 46 Struktura zrna vzorek č. 12

Z výsledků je možno pozorovat, že u křemíkových ocelí došlo k vytvoření velikosti zrn 10 pomocí průsečíkové metody dle ČSN ISO 643, které jsou o řád vyšší než u standartních materiálů (51CrV4 a 52CrMoV4). Minimální velikost zrn se pohybuje na hranici 6 a 7. Tyto výsledky jsou vyhovující.

5 Zhodnocení vhodnosti volby vybraných materiálů pro výrobu pružin

Kapitola se zabývá zhodnocením výsledků vybraných materiálů, které byly testovány z hlediska jejich mechanických vlastností, tvrdosti a metalografického šetření (oduhličení povrchu, mikrostruktura pod povrchem, velikost zrna).

Z hlediska mechanických vlastností bylo dosaženo u všech zkoušených materiálů vyhovujících hodnot meze kluzu v tahu. Všechny materiály se pohybovaly nad minimální hodnotou $R_{p0,2} = 1300 \text{ MPa}$ (pro jakosti 54SiCr6, 52SiCrNi5 a 52CrMoV4) a $R_{p0,2} = 1200 \text{ MPa}$ (pro jakost 51CrV4). Vyhovujících hodnot u meze pevnosti v tahu se podařilo dosáhnout u tří jakostí (54SiCr6, 51CrV4 a 52CrMoV4), jen u jakosti 52SiCrNi5 dochází k mírnému překročení maximální hranice $R_m = 1750 \text{ MPa}$ a to o 22 MPa. Dosažení vyhovujících parametrů u této jakosti by mělo jít dosáhnout pomocí drobné korekce popouštěcích teplot při opakování experimentu U hodnot tažnosti a zúžení se podařilo dosáhnout vyhovujících hodnot jen u jakostí 51CrV4 a 52CrMov4. Nevyhovující hodnoty vykazují oba křemíkové materiály. U jakosti 54SiCr6 došlo pravděpodobně k chybnému měření nebo špatné výrobě vzorků. U jakosti 52SiCrNi5 mohlo dojít nejspíše k odchylce měření nebo díky vysoké hodnotě meze pevnosti v tahu, kdy při jejím snížení lze předpokládat, že u hodnot tažnosti a zúžení dojde k jejich zvýšení nad minimální požadavky. Oba křemíkové materiály (54SiCr6 a 52SiCrNi5) je potřeba znovu odzkoušet a provést vyhodnocení jejich výsledků a porovnat je s předchozími výsledky.

Výsledky tvrdosti u zkoušených materiálů můžeme rozdělit do dvou skupin. První skupinu tvoří jakosti 54SiCr6 a 51CrV4 a druhou skupinu jakosti 52SiCrNi5 a 52CrMoV4. První skupina byla pravděpodobně nerovnoměrně prokalena, to nám potvrzují výsledky, které vykazují drobné odchylky v jednotlivých vzdálenostech. Z hlediska vyhodnocení tvrdosti na povrchu a v jádře výsledky splňují požadavky dle normy ČSN EN 13298:2003, kdy nesmí být rozdíl mezi povrchem a jádrem větší než 3 jednotky HRC. U druhé skupiny můžeme konstatovat, že došlo k rovnoměrné prokalení, což nám dokazují i výsledky. Podmínka rozdílu mezi povrchem a jádrem, byla splněna.

K oduhličení povrchu dochází pouze u jedné jakosti, a to u 54SiCr6. Materiál po tepelném zpracování vykazuje oba druhy oduhličení. Dochází zde k úplnému oduhličení povrchu do hloubky 62 μm a částečnému oduhličení 98 μm . Celkové oduhličení činí tedy 160 μm . Oduhličení můžeme pozorovat už v základním materiálu, kde bylo zjevně vidět oduhličení do hloubky 168 μm . Hloubka oduhličené vrstvy zůstala prakticky stejná i po tepelném zpracování, jen došlo ke vzniku vrstvy úplného oduhličení,

kteří je dle normy ČSN EN 13298:2003 a požadavkům zákazníka nepřipustné. Zbylé tři jakosti (52SiCrNi5, 51CrV4 a 52CrMoV4) nevykazují žádné oduhličení povrchu, jen u jakosti 52SiCrNi5 se vyskytují jemné plytké nedokonalosti, které mohly vzniknout okujením. U jakosti 52SiCrNi5 byl předpoklad že by k oduhličení nemělo dojít, a dle výsledkům z metalografického šetření k němu opravdu nedošlo.

Po vyhodnocení mikrostruktury pod povrchem, kdy u jakostí 54SiCr6 a 51CrV4 došlo k vytvoření struktury tzv. směs základních popuštěných struktur (martenzit + dolní bainit) a u jakostí 52SiCrNi5 a 52CrMoV4 se vyskytuje popuštěný martenzit, lze považovat, že výsledné struktury materiálu splňují požadavky zadavatele práce a zákazníka.

Vyhodnocení velikosti zrna bylo provedeno pomocí průsečkové metody dle normy ČSN ISO 643 a pro přesnější výsledky i podle normy ASTM E 112. Výsledky naznačují, že u křemíkových materiálů dochází k vytvoření o řád lepšího zrna než u standardních jakostí (51CrV4 a 52CrMoV4). Tento závěr bychom měli ověřit v dalším experimentu. Každopádně všechny jakosti splňují minimální požadavky na velikost zrna.

V tabulce č. 24 je shrnuto celkové zhodnocení vhodnosti volby vybraných materiálů pro výrobu pružin.

Tab. 24 Zhodnocení vhodnosti volby vybraných materiálů pro výrobu pružin

Jakost materiálu	Mechanické zkoušky	Oduhličení povrchu materiálu	Mikrostruktura pod povrchem materiálu	Tvrdost	Velikost zrna
54SiCr6	Nevyhovující	Nevyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující
52SiCrNi5	Nevyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující
51CrV4	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující
52CrMoV4	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující	Vyhovující

Závěr

V teoretické části diplomové práce byl proveden průzkum požadavků na materiály pro výrobu šroubových pružin, které byly podrobně popsány v jednotlivých kapitolách, včetně dopadů na výsledný produkt. Následně byl obecně popsán postup výroby šroubových pružin s vysvětlením jednotlivých operací, které lze při výrobě uplatnit. V práci byla zmíněna obecná povrchová úprava pružin prodlužující jejich životnost.

Práce rovněž uvádí popis základních mechanických vlastností a chemického složení u základních materiálů. Na závěr druhé kapitoly je proveden rozbor vlivu jednotlivých legujících prvků materiálu na tepelném zpracování a rozbor příčin vzniku lomů na šroubové pružině.

Experimentální část popisuje postup provedené kontroly jakosti základních materiálů. Byly ověřeny mechanické vlastnosti a chemické složení zvolených jakostí a doplněny o metalografické šetření. Pro výrobu šroubových pružin byly použity jakosti materiálů 54SiCr6, 52SiCrNi5, 51CrV4 a 52CrMoV4. Z vyrobených pružin byly odebrány vzorky pro výrobu zkušebních těles pro mechanické zkoušky a metalografické šetření. Z výsledků mechanických zkoušek vyplývá, že u křemíkových materiálů došlo k nesplnění normovaných hodnot tažnosti a zúžení. U jakosti 54SiCr6 k tomu mohlo pravděpodobně dojít špatným měřením nebo špatnou výrobou vzorku. U jakosti 52SiCrNi5 se může jednat o nepřesnost měření, ale může to souviset i s vysokou mezí pevnosti v tahu. Doporučení je u obou jakostí nechat opakovat zkoušky, aby bylo možné výsledky potvrdit nebo vyvrátit. Zbylé dvě jakosti 51CrV4 a 52CrMoV4 splňují normativní požadavky.

Při vyhodnocení výsledků tvrdosti se ukázalo, že u všech jakostí byly splněny normativní požadavky, jen u jakostí 54SiCr6 a 51CrV4 došlo k výkyvům hodnot, což bych přičítal nerovnoměrnému prokalení nebo výskytu spodního bainitu ve struktuře. Požadavek na velikost zrna byl u všech jakostí splněn.

K oduhličení povrchu bylo dosaženo pouze u jedné jakosti. Jakost 54SiCr6 vykazovala po tepelném zpracování oduhličení povrchu do hloubky 160 μm . Nelze zcela přesně určit, zda oduhličení vzniklo v důsledku tepelného zpracování v peci bez plynné atmosféry, protože částečné oduhličení (délka 168 μm) bylo zjevné už na metalografických výsledcích před tepelným zpracováním. Po tepelném zpracování došlo na povrchu k vytvoření úplného oduhličení. Celková hloubka oduhličení tedy činila 160 μm a oproti naměřenému oduhličení před tepelným zpracováním se výrazně nezměnila. Naopak u druhého křemíkového materiálu (52SiCrNi5) k oduhličení povrchu nedošlo, přičítám to legujícímu prvku niklu, který má předpoklad oduhličení zabraňovat.

Z hlediska mikrostruktury pod povrchem lze konstatovat, že všechny jakosti splňují požadované mikrostruktury.

V závěrečném hodnocení obou křemíkových materiálů, je nutno říct, že z experimentu vyšel lépe druhý křemíkový materiál 52SiCrNi5. Vzhledem k tomu, že u jakosti 54SiCr6 se vyskytovalo částečné oduhličení povrchu už v základním materiálu před tepelným zpracováním, nelze jednoznačně určit, zda je tento materiál potřeba tepelně zpracovávat v pecích s plynnou atmosférou, protože není jasné, zda by k oduhličení případně jak velkému došlo, kdyby se na základním materiálu oduhličení nevyskytovalo. U materiálu 52SiCrNi5 z výsledků vyplývá, že k oduhličení nedochází a je možno tedy tento materiál zpracovávat i v peci bez ochranné atmosféry. Je potřeba tedy u obou materiálů provést další experimenty, s případnou korekcí technologických parametrů např.: teplot, časů.

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Lucii Krejčí, Ph.D za cenné rady, připomínky, ochotu a strávený čas, který věnovala vedení mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval konzultantovi ve firmě Ing. Petrovi Zapletalovi za rady, připomínky a poskytnuté informace k vypracování diplomové práce a také Michalovi Koudelkovi, který mi pomohl při výrobě pružin a za jeho cenné rady.

Seznam použité literatury

- [1] SERCEL, Daniel. *Materiály pro výrobu pružin*. Brno, 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení v Brně. Vedoucí práce Karel Němec.
- [2] Výroba kruhové oceli. *Bolzano.cz* [online]. Kladno [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/obecna-cast/vyroba-tycove-oceli-tvarenim-za-tepla-tok-materialu>
- [3] NAKLÁDAL, Lukáš. *Robotizace linky tepelného zpracování HŽ9*. Brno, 2008. Diplomová práce. Vysoké učení v Brně. Vedoucí práce František Bradáč.
- [4] Šroubové pružiny. *Hzp.cz* [online]. Prostějov, 2017, 2017 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://hzp.cz/sroubove-pruziny>
- [5] ČSN EN 13906-1. *Šroubové válcované pružiny vyráběné z drátů a tyčí kruhového průřezu – Výpočet a konstrukce – Část 1: Tlačné pružiny*. Český normalizační institut
- [6] NEKOKSA, Pavel. *Dosedý válcových šroubových tlačných pružin*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jaroslav Kašpárek.
- [7] Tuhost pružiny. *Slideplayer.cz* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3000358/>
- [8] Využití pružin v praxi. *Hzp.cz* [online]. Prostějov, 2017 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.hzp.cz/ostatni-prumysl>
- [9] Podvozek vysokorychlostního vlaku. *Spz.logout.cz* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: http://spz.logout.cz/vozidla/680/680_cd.html
- [10] Podvozek metra. In: *Commons.wikimedia.org* [online]. 2018, 7.12.2013 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DOD_depo_Hostiva%C5%99,_podvozek_metra.jpg
- [11] Přehled vlastností oceli 51CrV4. *Bolzano.cz* [online]. Kladno [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/pruzinove-oceli-pro-zuslechtovani-podle-csn-en-10089/prehled-vlastnosti-oceli-51crv4>
- [12] ČSN EN 10089. *Oceli válcované za tepla na zušlechtěné pružiny – Technické dodací podmínky*. Český normalizační ústav, 2006.
- [13] Přehled vlastností oceli 52CrMoV4. *Bolzano.cz* [online]. Kladno [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/pruzinove-oceli-pro-zuslechtovani-podle-csn-en-10089/prehled-vlastnosti-oceli-52crmov4>

- [14] Specializace oceli 52SiCrNi5. *Ferlatacciai.com* [online]. 2008 [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://www.ferlatacciai.com/steel/acciaio-45.htm>
- [15] *ÚNAVOVÉ VLASTNOSTI VYBRANÉ PRUŽINOVÉ OCELI*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Vysoké učení v Brně. Vedoucí práce Stanislav Věchet.
- [16] Rozdělení korozivzdorných materiálů. In: *Ústav materiálového inženýrství: Fakulta strojní* [online]. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/01_kkm_rodeleni_korozivzdornych_materialu.pdf
- [17] Vliv legujících prvků. *Svanda.webz.cz* [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [18] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [19] Vliv legujících prvků na tepelné zpracování. *Svanda.webz.cz* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://svanda.webz.cz/vyuka/legury.htm>
- [20] *Technická zpráva firmy*. Prostějov, 2017.
- [21] FREMUNT, P., T. PODRÁBSKÝ. *Konstrukční oceli*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 1996. 261 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001. ISBN 80-720-4193-2.
- [23] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli: Metalografická příručka*. Praha: SNTL, 1977.

Seznam příloh

Příloha A	Atesty materiálů
Příloha B	Metalografické šetření - fotky povrchu vzorků č. 11, 13, 14, 15, 22, 23 a mikrostruktura pod povrchem vzorků č. 11, 13, 14, 15, 22 a 23
Příloha C	Fotky z termokamery pružin č. 6, 9 a 12

Příloha A

Atest materiálu jakosti 54SiCr6



TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Druh dokumentu																									
Inspekční certifikát 3.1, EN 10204:2004																									
A01/A05 Výrobní závod						Stránka																			
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic						1/1																			
A03 Číslo dokumentu						2016/11/009137-MAR																			
A07 Číslo objednávky 162000009				A06 Příjemce GREWIS-SPRINGS s.r.o.																					
A10 Číslo kontraktu 0041418719				Boskovická 618																					
A08 Číslo zakázky 3300251254/000010				798 03 Plumlov																					
				Česká republika																					
B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance			B02, B04 Označení oceli / Stav dodaný		B03 Materiálová norma		B03 Rozměrová norma																		
Tyče kruhové 34 mm + 0,600 - 0,600 4,100 m +100 -0			14260 .0		ČSN 414260		EN 10060																		
A11 Dopr. prostředek č.	A12 Ložný list č.	B07 Tavba	B08 Kruhy / Kusy	B08 Svazky	B13 Hmotnost (kg)																				
6C68311 6C68355	3316013709	T43074	0	1	2005																				
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby		C71-C92 Chemické složení [%]																							
T43074/2016 BO-ZPO2		<table border="1"> <tr> <td>C</td> <td>Mn</td> <td>Si</td> <td>P</td> <td>S</td> <td>Cu</td> <td>Cr</td> <td>Ni</td> <td>N</td> </tr> <tr> <td>0.53</td> <td>0.70</td> <td>1.42</td> <td>0.012</td> <td>0.009</td> <td>0.02</td> <td>0.67</td> <td>0.02</td> <td>0.0040</td> </tr> </table>						C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	N	0.53	0.70	1.42	0.012	0.009	0.02	0.67	0.02	0.0040
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	N																	
0.53	0.70	1.42	0.012	0.009	0.02	0.67	0.02	0.0040																	
Mechanické hodnoty																									
B07 Tavba	B05 Stav zkoušení	C11 Mez kluzu Re [MPa]	C12 Mez pevnosti Rm [MPa]	C13 Tažnost A5 [%]	C14 Kontrakce Z [%]	B05 Stav zkoušení	C03 Zkušební teplota	C40, C42 Zkouška rázem v ohybu KV [J] / KCV [J/cm ²]																	
T43074	.7	1329	1478	9,6	35,8																				
		1319	1487	8,3	32,8																				
Vzorek d 10 mm																									
B07 Tavba	D56 Péčovací zkoušky (EN 10263-1)	D57 Oduhličení (max. / mm)	C54 Mikročistota (DIN 50602)	C57 Velikost zrna	C30 Tvrdość HB	C93 Vakuování																			
T43074						ano																			
B07 Tavba	D02 UZ kontrola	D54 Povrchové vady																							
T43074	EN 10308/3	EN 10221/B																							
D01 Kontrola povrchu, tvaru a rozměru odpovídá objednávce.																									
D05 Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg.						A04 Značka výrobce																			
Z01 Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky.																									

Z02 Potvrdil : Jašek Radim, Ing., Třinec: 23.11.2016	referent TJu, nezávislý oprávněný zástupce	Ing. Radim Jašek <i>independent authorized agent</i> <i>unabhängiger berechtigter Vertreter</i> <i>nezávislý oprávněný zástupce</i>
--	--	---



Podjetje za proizvodnjo jekel d.o.o.

Železarska cesta 3, 3220 Štore, Slovenija

tel.: ++386 3 7805-100, fax: ++386 3 7805-384

Date: 13.8.2012

INSPECTION CERTIFICATE

EN 10204/3.1

No.: 12ATE008380

Purchaser

HANACKE ŽELEZARNY A PEROVNY

DOLNI 100

CZ-79711

PROSTEJOV

CZECH REPUBLIC

Order No.: 450566367

Our order No.: 12050000271/1

Delivery note: 12300003509/2

Delivery date: 13.8.2012

Transport: By truck 5B86959 4B90575

Product: PEELED ROUND + ANNEALED STEEL / 668 / EN 10089 - 52SiCrNi5+A+HH

Cast No.	Quality	Dim (mm)	Weight (kg)	Bundle	Melting furnace	Dim.of billet
58915	52SiCrNi5	33	2385	1	E	# 180

CHEMICAL COMPOSITION OF CAST (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	H						
0.53	1.36	0.78	0.016	0.024	0.81	0.57	0.19	0.00020						

Hardness in as delivered condition 268 HB

MECHANICAL PROPERTIES

JOMINY (HRC):

DIN 50191 HH

1.5	3	5	7	9	11	13	15	20	25	30	35	40	45	50						
62	62	61	60	60	59	59	58	58	57	56	53	48	45	42						

METALLOGRAPHIC EXAMINATIONS

Grain size (ISO 643): 6

Nonmetallic inclusion: (DIN 50602) K4: 5

ADDITIONAL DEMAND

Ultrasonic test

100% kontrola - EN 10308

Radioactivity

Material is not radioactiv

We hereby certify, that the material described above complies with the terms of the order contract.

Quality assurance

DRAGO TRUNKL, INŽ.

STOREQSTEEL

Podjetje za proizvodnjo jekel d.o.o.

Železarska cesta 3, 3220 Štore 9

Atest materiálu jakosti 51CrV4


TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Druh dokumentu / Type of inspection document																																																	
Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004																																																	
A01/A05 Výrobci závod / Manufacturer						Stránka / Page																																											
TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic						A03 Číslo dokumentu / Document No.		1/2																																									
						2016/10/002027-MAR																																											
A07 Číslo objednávky / Purchaser's order No.					A08 Příjemce / Consignee																																												
4500850545					HŽP a.s.																																												
A10 Číslo kontraktu / Contract No.					Dolní 3137/100, Skl.kruh.pruž.oceli																																												
0041407733					796 01 Prostějov																																												
A08 Číslo zakázky / Manufacturer's order No.					Česká republika																																												
3300246512/000010																																																	
B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Product description / Dimensions / Tolerance				B02, B04 Označení oceli / Stav dodání Steel designation / Deliv. state		B03 Materiálová norma Classification standard		B03 Rozměrová norma Dimensional standard																																									
Tyče kruhové loupáné(h11) Peeled Round bars(h11)				51CrV4 +A		EN 10089:2002 TDP-KR01/14/ 19.05.2014		EN 10278																																									
34 mm + 0,000 - 0,160																																																	
3,990 m +10 -10																																																	
A11 Dopr. prostředek č. Wagon No.		A12 Ložný list č. Loading list No.		B07 Tavba Heat No.		B08 Kruhy / Kusy Coils / Pieces		B11 Hmotnost (kg) Weight (kgs)																																									
BT42186 4T83086		3916003660		T45386		158		2 4464																																									
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Heat No. / Year of production / Steelmaking process		C71-C92 Chemické složení-Chemical composition [%]																																															
T45386/2016 BO-ZPO2 BOF-CC billets		<table border="1"> <tr> <td>C</td> <td>Mn</td> <td>Si</td> <td>P</td> <td>S</td> <td>Cu</td> <td>Cr</td> <td>Al</td> <td>H</td> <td>V</td> </tr> <tr> <td>0.50</td> <td>0.96</td> <td>0.29</td> <td>0.013</td> <td>0.011</td> <td>0.02</td> <td>1.08</td> <td>0.003</td> <td>1.60 ppm</td> <td>0.137</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Sn</td> <td colspan="8"></td> </tr> <tr> <td colspan="2">0.002</td> <td colspan="8"></td> </tr> </table>								C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Al	H	V	0.50	0.96	0.29	0.013	0.011	0.02	1.08	0.003	1.60 ppm	0.137	Sn										0.002									
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Al	H	V																																								
0.50	0.96	0.29	0.013	0.011	0.02	1.08	0.003	1.60 ppm	0.137																																								
Sn																																																	
0.002																																																	
Mechanické hodnoty-Mechanical values																																																	
B07 Tavba Heat No.	B05 Stav zkoušení Test state	C11 Mez kluzu Yield point Re (MPa)	C12 Mez pevnosti Tensile strength Rm (MPa)	C13 Tažnost Elongation A5 (%)	C14 Kontrakce Contraction Z (%)	B05 Stav zkoušení Test state	C03 Zkušební teplota Test temperature	C40, C42 Zkouška rázem v ohybu Energy of impact KUJ[J]/KCU[J/cm2]																																									
T45386	+QT	1349	1477	11,9	51,2	+QT	+20 °C	27,0	54,0																																								
		1366	1478	11,2	48,0			29,2	58,4																																								
	Vzorek d 10 mm Sample d 10 mm							25,1	50,1																																								
B07 Tavba Heat No.	D66 Péchovací zkoušky Heating tests (EN 10263-1)	D67 Oduhličení Decarburization (max. / mm)	C64 Mikročistota Micropurity (DIN 50602)	C57 Velikost zrna Grain size (ISO 643)	C30 Tvrdost HB Hardness HB	C93 Vakuování Vacuum degassing																																											
T45386		garance/ guarantee	K3: 0,00 0,00 0,00	8	193 - 207	ano/yes																																											



TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY
MORAVIA STEEL

A02 Druh dokumentu / Type of inspection document	
Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004	
A01/A05 Výrobní závod / Manufacturer	
TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY, a.s., Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic	
A03 Číslo dokumentu / Document No.	
2016/10/002027-MAR	
B07 Tavba Heat No.	D05 Drsnost Roughness (max. / micron)
T45386	Ra - 0,350 Rmax - 1,620
D02 Už kontrola US test	
100% EN 10308	
C54 Mikročistota Micro purity (DIN 50902 - met. M)	
SS OA OS OG 1,5 0,0 0,0 0,3	
B07 Tavba Heat No.	D04 Povrchové vady Surface defects
T45386	100% EN 10277-1/4
B07 Tavba Heat No.	C55 Prokalitelnost Jomini curve
T45386	mm 1,5 3 5 7 9 11 13 15 20 25 30 35 40 45 50 ----- HRC 63 62 62 61 61 61 61 60 56 52 48 47 43 43 41
D01 Kontrola povrchu, tvaru a rozměru odpovídá objednávce. Control of surface, shape and dimension corresponds to the order	
D05 Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg. Radio - isotopic activity was controlled in ladle sample, it was no higher than 100 Bq/kg.	
Z01 Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky. Products conform with the prescription of order.	
A04 / Značka výrobce / Manufacturer's logo	
Z03 Tento dokument byl elektronicky podepsán v souladu se zákonem č. 227/2000Sb. This document was electronically undersigned according to Law No. 227/2000Coll.	
Z02 Potvrdil - Expert : Kantor Adam, Ing., referent T.Ju, nezávislý oprávněný zástupce Officer for Quality Inspection, Releasing and Attestation, independent authorized agent	
Třinec: 06.10.2016	

Atest materiálu jakosti 52CrMoV4

A04 Značka výrobce / Manufacturer's logo


TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Druh dokumentu / Type of inspection document

Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004

A01/A05 Vyrobní závod / Manufacturer

 TRINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.,
 Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic
Stránka / Page
1/2

A03 Číslo dokumentu / Document No.

2014/11/001268-MAR

A07 Číslo objednávky / Purchaser's order No.

4500704037

A10 Číslo kontraktu / Contract No.

0041312160

A08 Číslo zakázky / Manufacturer's order No.

3300205627/000010

A06 Příjemce / Consignee

Hanácké železářny a pérovný, a.s.

Dolní 100, Skl.kruh.pruž.oceli

797 11 Prostějov

Česká republika

B01, B09-B11 Popis výrobku / Rozměry / Tolerance Product description / Dimensions / Tolerance		B02, B04 Označení oceli / Stav dodaný Steel designation / Deliv. state		B03 Materiálová norma Classification standard		B03 Rozměrová norma Dimensional standard					
Tyče kruhové loupané(h11) Peeled Round bars(h11)		52CrMoV4 +A		EN 10089:2002 TDP-KR01/14/ 19.05.2014		EN 10278					
35,5 mm + 0,000 - 0,160											
3,670 m +50 -0											
A11 Dopr. prostředek č. Wagon No.	A12 Ložný list č. Loading list No.	B07 Tavba Heat No.	B08 Kruhy / Kusy Coils / Pieces	B08 Svazky Crbd	B13 Hmotnost (kg) Weight (kgs)						
4M92529 3M02329	3914004872	T20117	0	2	2986						
B07, B14, C70 Tavba / Rok výroby / Způsob výroby Heat No. / Year of production / Steelmaking process		C71-C92 Chemické složení-Chemical composition [%]									
T20117/2014 BO-ingot BOF-ingots		C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Al	H	N
		0.52	1.03	0.28	0.017	0.007	0.02	1.07	0.003	1.70 ppm	0.0058
		Mo	V	Sn							
		0.206	0.113	0.002							
Mechanické hodnoty-Mechanical values											
B07 Tavba Heat No.	B06 Stav zkoušení Test state	C11 Mez kluzu Yield point Re [MPa]	C12 Mez pevnosti Tensile strength Rm [MPa]	C13 Tažnost Elongation A5 [%]	C14 Kontrakce Contraction Z [%]	B05 Stav zkoušení Test state	C03 Zkušební teplota Test temperature	C40, C42 Zkouška rázem v ohybu Energy of impact KUJ(J)/KCUJ(J/cm2)			
T20117	+QT	1502	1621	8,4	66,5	+QT	+20 °C	23,9 47,8			
		1512	1625	8,0	63,1			24,9 49,8			
		Vzorek d 10 mm Sample d 10 mm						22,0 43,9			
B07 Tavba Heat No.	D56 Péčovací zkoušky Heading tests (EN 10263-1)	D57 Oduhličení Decarburization (max. / mm)	C54 Mikročistota Micropurity (DIN 50602)			C57 Velikost zrna Grain size (ISO 643)	C30 Tvrdość HB Hardness HB	C93 Vakuování Vacuum degassing			
T20117			garance/ guarantee			K4: 0,00 0,00 0,00	8	191 - 210 ano/yes			
B07 Tavba Heat No.	D65 Orsnost Roughness (micron)	D62 UZ kontrola US test		C54 Mikročistota Micropurity (DIN 50602 - met. M) SS QA OS OG							
T20117	max. 0,269	100% EN 10308/4		2,2 1,0 0,8 0,3							

A04 Značka výrobce / Manufacturer's logo


TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY
MORAVIA STEEL

A02 Druh dokumentu / Type of inspection document

Inspekční certifikát 3.1 - Inspection certificate 3.1, EN 10204:2004

A01/A05 Výrobní závod / Manufacturer

TŘINECKÉ ŽELEZÁŘNY, a.s.,
 Průmyslová 1000, Staré Město, 739 61 Třinec, Czech Republic

 Stránka / Page
 2 / 2

A03 Číslo dokumentu / Document No.

2014/11/001268-MAR

B07

Tavba

Heat No.

D54

Povrchové vady

Surface defects

T20117 100% EN 10277-1/4

B07

Tavba

Heat No.

C65

Prokalitelnost

Jomini curve

 T20117 mm 1,5 3 5 7 9 11 13 15 20 25 30 35 40 45 50

 HRC 64 64 63 62 62 62 62 61 61 60 58 58 57 56 55

D05

 Dodržena radioizotopická aktivita tavebního vzorku - max. 100 Bq/kg.
 Radio - isotopic activity was controlled in ladle sample, it was no higher than 100 Bq/kg.

Z01

 Dodaný materiál odpovídá předpisu objednávky.
 Products conform with the prescription of order.

Z03

 Tento dokument byl elektronicky podepsán v souladu se zákonem č. 227/2000Sb.
 This document was electronically undersigned according to Law No. 227/2000Coll.

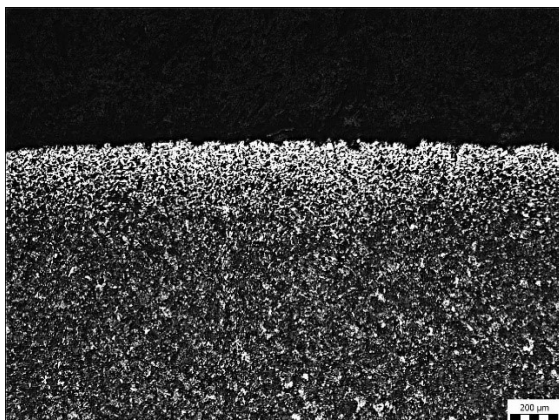
Z02

Potvrdil - Expert : Kantor Adam, Ing.,

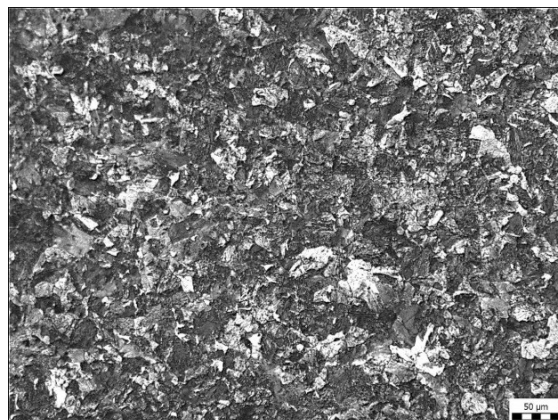
 referent T.Ju, nezávislý oprávněný zástupce
 Officer for Quality Inspection, Releasing and Attestation, independent authorized agent

Třinec: 05.11.2014

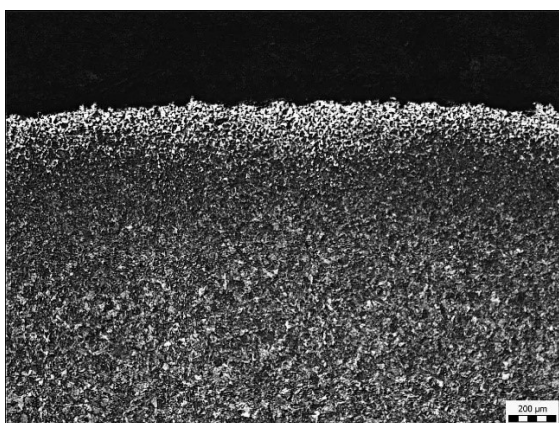
Příloha B



Obr. 3.1 a Detail povrchu vzorku č. 11



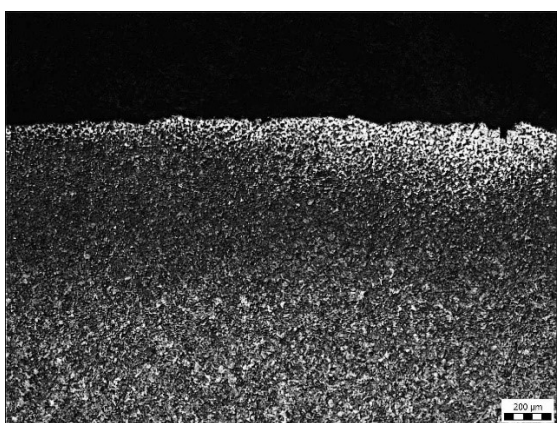
Obr. 3.1 b Mikrostruktura vzorku č. 11 pod povrchem



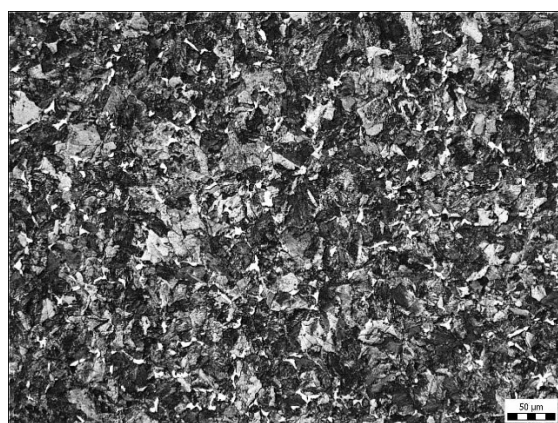
Obr. 3.2 a Detail povrchu vzorku č. 13



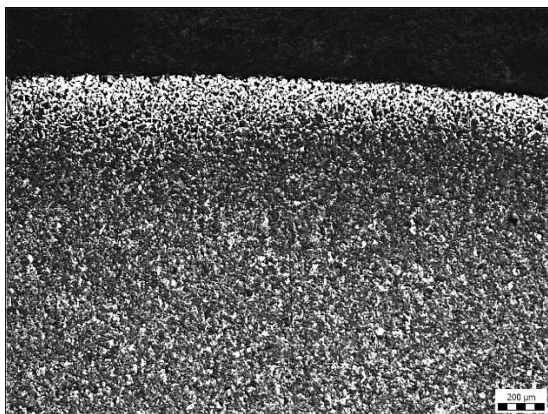
Obr. 3.2 b Mikrostruktura vzorku č. 13 pod povrchem



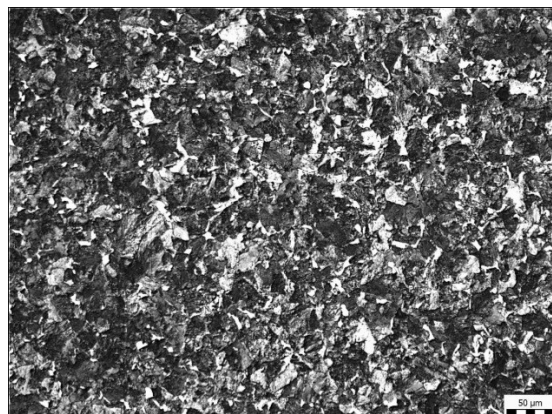
Obr. 3.3 a Detail povrchu vzorku č. 14



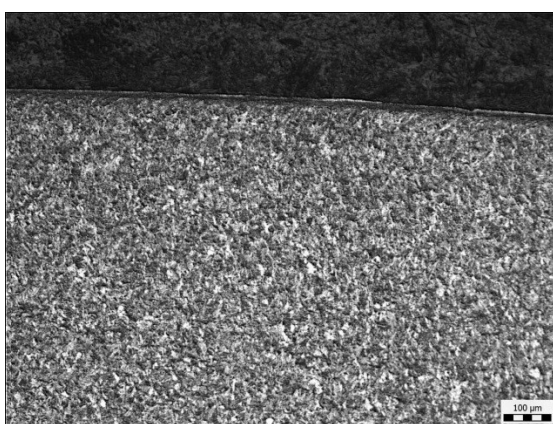
Obr. 3.3 b Mikrostruktura vzorku č. 14 pod povrchem



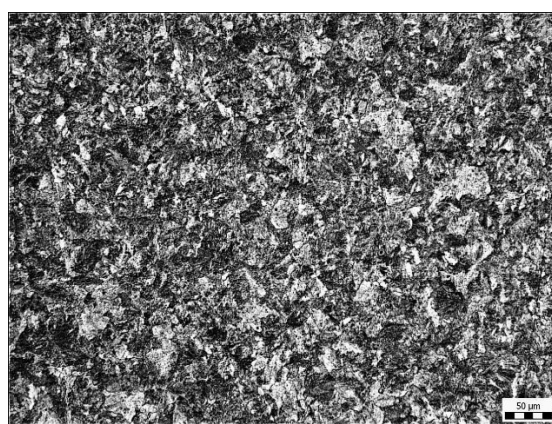
Obr. 3.4 a Detail povrchu vzorku č. 15



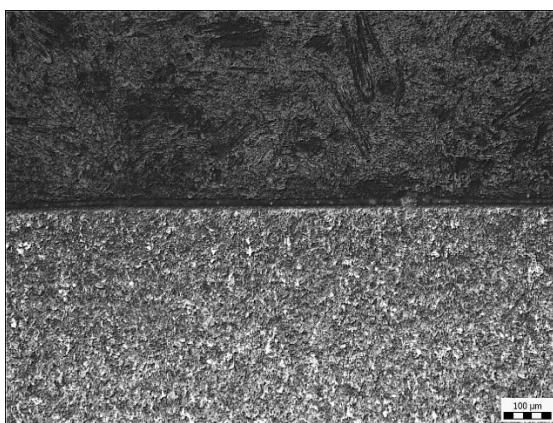
Obr. 3.4 b Mikrostruktura vzorku č. 15 pod povrchem



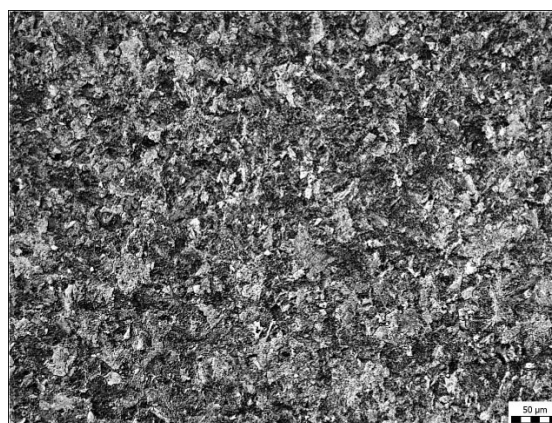
Obr. 3.5 a Detail povrchu vzorku č. 22



Obr. 3.5 b Mikrostruktura vzorku č. 22 pod povrchem



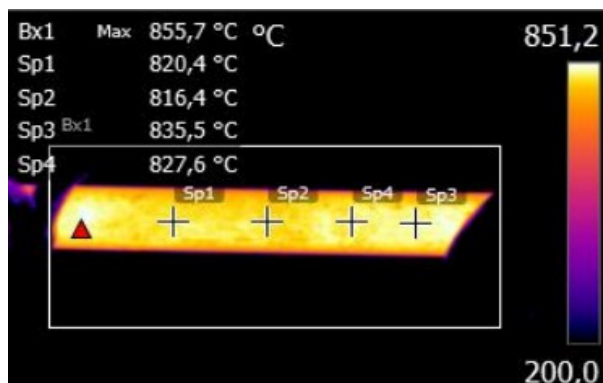
Obr. 3.6 a Detail povrchu vzorku č. 23



Obr. 3.6 b Mikrostruktura vzorku č. 23 pod povrchem

Příloha C

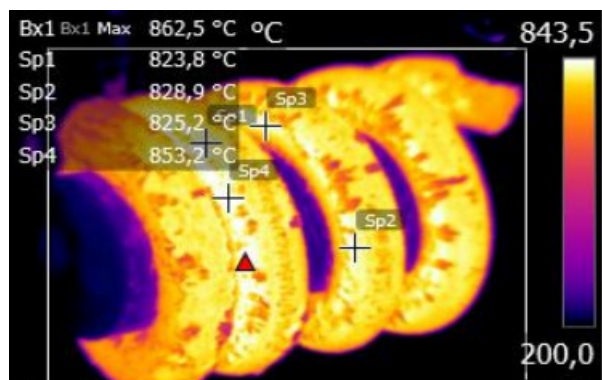
Fotky z termokamery pružiny č. 6.



Obr. 3.7 a. Teplota tyče (doraz dopravníku)



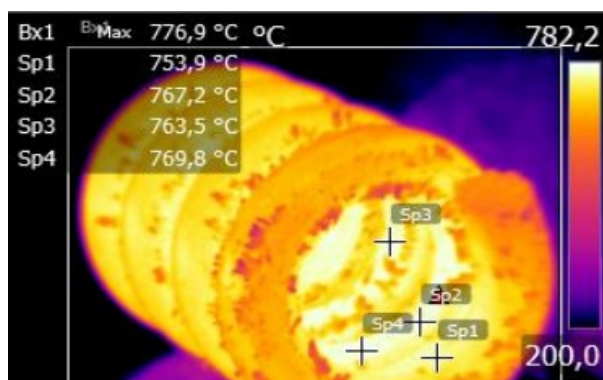
Obr. 3.7 b Teplota tyče (doraz dopravníku)



Obr. 3.8 a Měření teploty pružiny na trnu



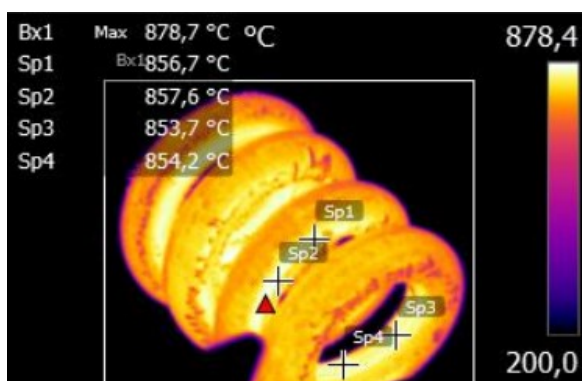
Obr. 3.8 b Pružina na trnu



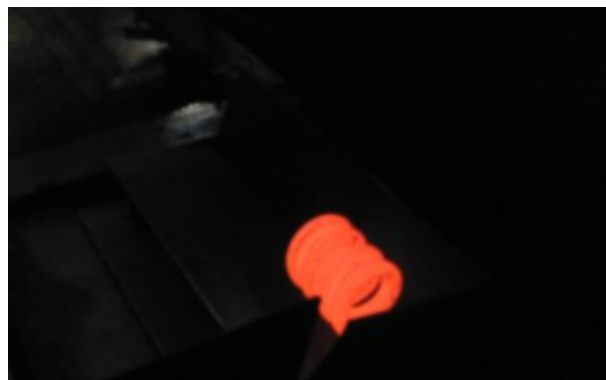
Obr. 3.9 a Teplota pružiny před dohřívací pecí



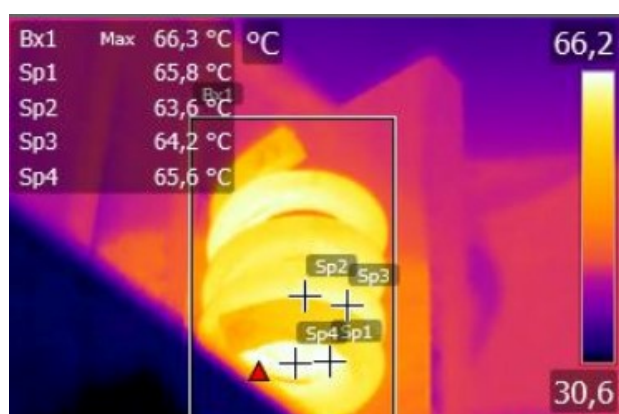
Obr. 3.9 b Pružina před dohřívací pecí



Obr. 3.10 a Měření teploty před kalením



Obr. 3.10 b Pružina před kalením

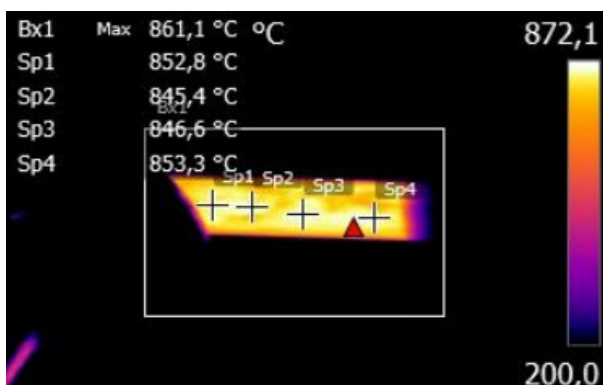


Obr. 3.11 Teplota pružiny po kalení



Obr. 3.12 Výsledná pružina č.6

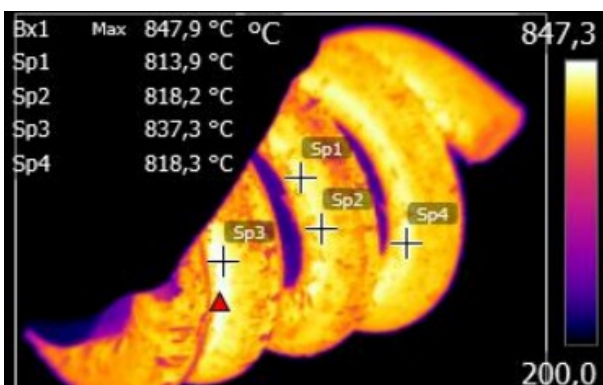
Fotky z termokamery pružiny č. 9



Obr. 3.13 a. Teplota tyče (doraz dopravníku)



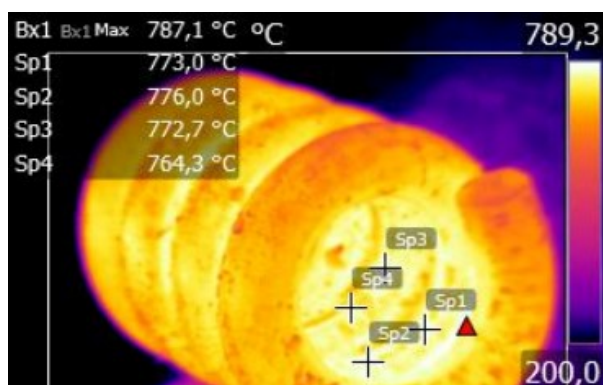
Obr. 3.13 b Teplota tyče (doraz dopravníku)



Obr. 3.14 a Měření teploty pružiny na trnu



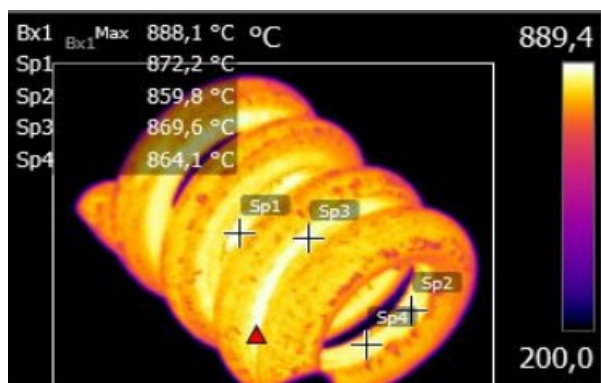
Obr. 3.14 b Pružina na trnu



Obr. 3.15 a Teplota pružiny před dohřívací pecí



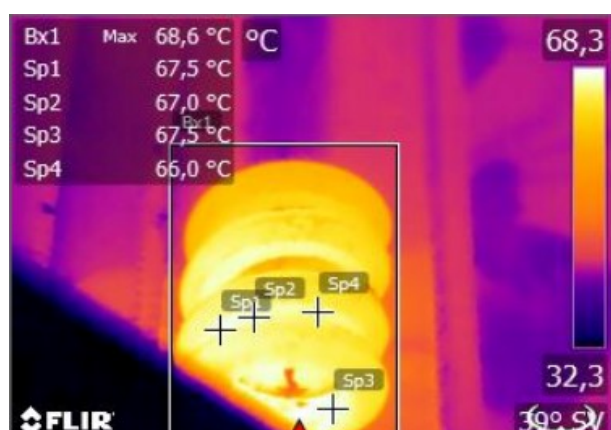
Obr. 3.15 b Pružina před dohřívací pecí



Obr. 3.16 a Měření teploty před kalením



Obr. 3.16 b Pružina před kalením

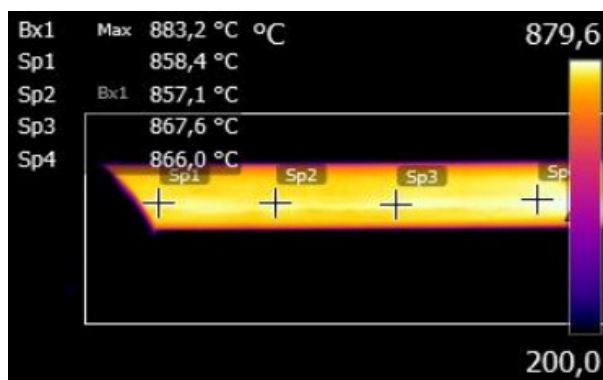


Obr. 3.17 Teplota pružiny po kalení



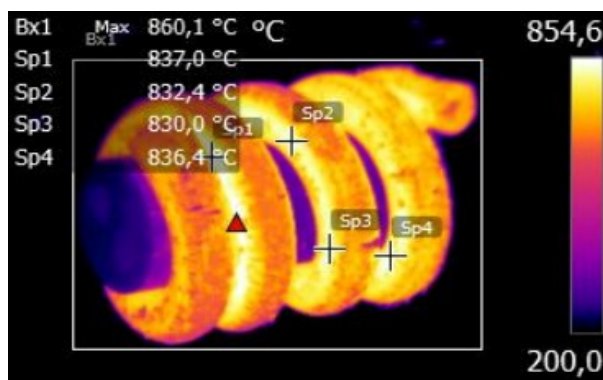
Obr. 3.18 Výsledná pružina č.9

Fotky z termokamery pružiny č. 12



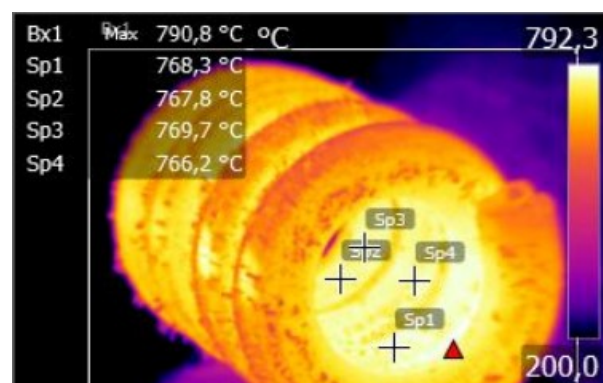
Obr. 3.19 a. Teplota tyče (doraz dopravníku)

Obr. 3.19 b Teplota tyče (doraz dopravníku)



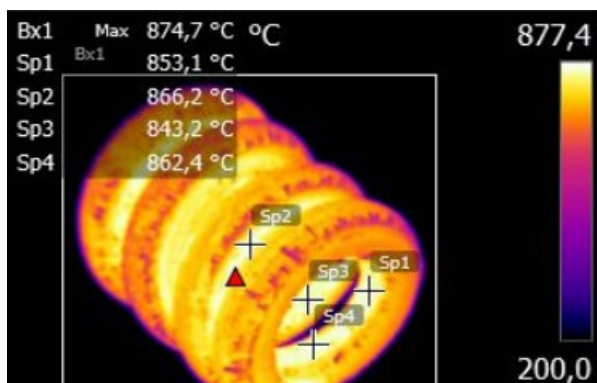
Obr. 3.20 a Měření teploty pružiny na trnu

Obr. 3.20 b Pružina na trnu

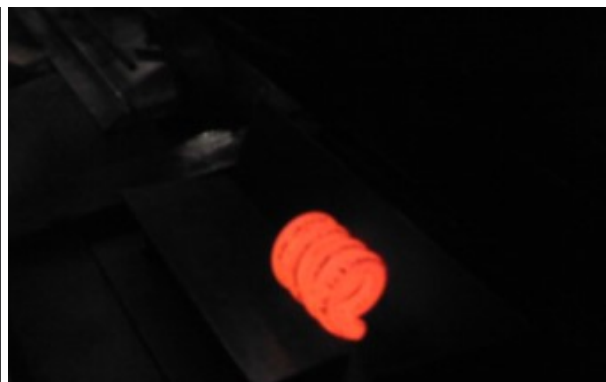


Obr. 3.21 a Teplota pružiny před dohřívací pecí

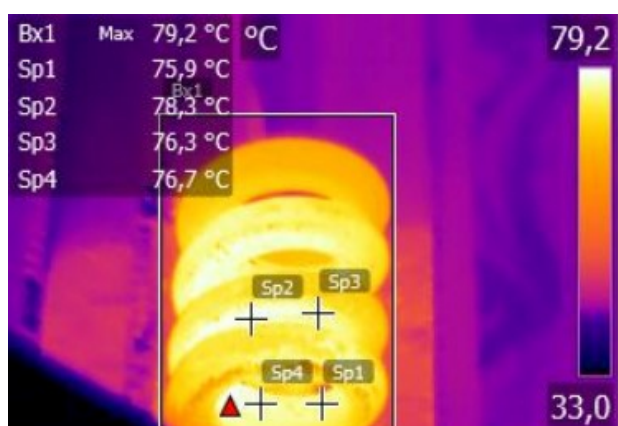
Obr. 3.21 b Pružina před dohřívací pecí



Obr. 3.22 a Měření teploty před kalením



Obr. 3.22 b Pružina před kalením



Obr. 3.23 Teplota pružiny po kalení



Obr. 3.24 Výsledná pružina č.12